

Florian Wiest

Mikrosystemtechnische Realisierung von Induktivitäten

DISTRIBUTION STATEMENT A:
Approved for Public Release -
Distribution Unlimited

**SHAKER
VERLAG**

REPORT DOCUMENTATION PAGE

Form Approved OMB No. 0704-0188

Public reporting burden for this collection of information is estimated to average 1 hour per response, including the time for reviewing instructions, searching existing data sources, gathering and maintaining the data needed, and completing and reviewing the collection of information. Send comments regarding this burden estimate or any other aspect of this collection of information, including suggestions for reducing this burden to Washington Headquarters Services, Directorate for Information Operations and Reports, 1215 Jefferson Davis Highway, Suite 1204, Arlington, VA 22202-4302, and to the Office of Management and Budget, Paperwork Reduction Project (0704-0188), Washington, DC 20503.

1. AGENCY USE ONLY (Leave blank)		2. REPORT DATE 2001	3. REPORT TYPE AND DATES COVERED Dissertation	
4. TITLE AND SUBTITLE Mikrosystemtechnische Realisierung von Induktivitaeten Microsystem-technical Realization of Inductances			5. FUNDING NUMBERS	
6. AUTHOR(S) Florian Wiest			8. PERFORMING ORGANIZATION Report Number REPORT NUMBER	
7. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) Fakultaet fuer Elektrotechnik, Institut fuer Physik			10. SPONSORING/MONITORING AGENCY REPORT NUMBER ISSN 0945-0718	
9. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) Universitaet der Bundeswehr Muenchen			11. SUPPLEMENTARY NOTES Text in German. Title and abstract in German and English, 126 pages, ISSN 0945-0718, ISBN3-8265-9549-1.	
12a. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT Distribution A: Public Release.			12b. DISTRIBUTION CODE	
<p>ABSTRACT (Maximum 200 words)</p> <p>The dissertation discusses a completely new concept for the realization of specific inductance construction forms, with which, in parallel construction, one might work on a multitude of coils integrated into processing usage. Firstly, the author sets out his principles for production and characterization; secondly, he describes the usage process in detail, so as to provide exempla for his empirical research. The next and largest chapter focuses on the deformation of the microstructures, including the area metalization, the photolithographic manufacture of galvanic forms, the Excimer laser-photolithography, the deformation of the track run, and dielectric passivation. The last chapter involves electric characterization.</p>				
14. SUBJECT TERMS German, UNIBW, Inductance, Photolithography, Dielectric passivation, Metallization, Excimer laser			15. NUMBER OF PAGES	
			16. PRICE CODE	
17. SECURITY CLASSIFICATION OF REPORT UNCLASSIFIED	18. SECURITY CLASSIFICATION OF THIS PAGE UNCLASSIFIED	19. SECURITY CLASSIFICATION OF ABSTRACT UNCLASSIFIED	20. LIMITATION OF ABSTRACT UNLIMITED	

UNIVERSITÄT DER BUNDESWEHR MÜNCHEN
Fakultät für Elektrotechnik
Institut für Physik

Mikrosystemtechnische Realisierung von Induktivitäten

Florian Wiest

Vorsitzender des Promotionsausschusses: Prof. Dr.-Ing. H. Lindenmeier
1. Berichterstatter: Prof. Dr. rer. nat. I. Eisele
2. Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. H. Baumgärtner

Tag der Prüfung: 02. Oktober 2001

Mit der Promotion erlangter akademischer Grad:
Doktor-Ingenieur
(Dr.-Ing.)

Neubiberg, 31. Oktober 2001

Der Druck dieser Arbeit wurde durch Haushaltsmittel der
Universität der Bundeswehr München gefördert.

20021122 159

AQ F03-02-0398

**Reproduced From
Best Available Copy**

**Copies Furnished to DTIC
Reproduced From
Bound Originals**

Berichte aus der Elektrotechnik

Florian Wiest

**Mikrosystemtechnische
Realisierung von Induktivitäten**

Shaker Verlag
Aachen 2001

Die Deutsche Bibliothek - CIP-Einheitsaufnahme

Wiest, Florian:

Mikrosystemtechnische Realisierung von Induktivitäten /

Florian Wiest. Aachen : Shaker, 2001

(Berichte aus der Elektrotechnik)

Zugl.: München, Univ. der Bundeswehr, Diss., 2001

ISBN 3-8265-9549-1

Copyright Shaker Verlag 2001

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 3-8265-9549-1

ISSN 0945-0718

Shaker Verlag GmbH • Postfach 1290 • 52013 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • eMail: info@shaker.de

Zusammenfassung

Induktivitäten sind elementare passive Bauelemente der Elektronik, die in nahezu allen elektrischen Geräten Verwendung finden. Durch die drahtlose Kommunikation ist der Bedarf an diesem Bauelement in miniaturisierter Ausführung drastisch gestiegen, wobei Firmen wie TDK, Matsushita (Panasonic), Epcos, Coilcraft, Taiyo Yuden und Toko zu den führenden Herstellern für kleine Induktivitätsbauformen zählen.

Bis jetzt werden nahezu alle Spulenbauformen in der klassischen Drahtwickeltechnik hergestellt. Lediglich bei der Verkleinerung (im Folgenden: Shrink) von der 2,0 mm langen Spulenbauform auf die 1,6 mm lange Baugröße wurde z.B. bei Epcos die Fertigung von der Wickeltechnik auf die serielle Laserstrukturierung von vollmetallisierten Spulenrohlingen umgestellt (im Folgenden: Laserwendeln). Mit den zukünftig zu entwickelnden nächst kleineren Shrinkgenerationen mit einer Länge von 1,0 mm bzw. 0,6 mm werden allerdings die Grenzen dieser Subtraktivtechnik erreicht.

Daher trat im Zuge einer Evaluierung von neuartigen Fertigungsverfahren für miniaturisierte Induktivitäten die Firma Epcos vor vier Jahren an das Institut für Physik der Universität der Bundeswehr heran, um die Einsatzmöglichkeiten von Mikrosystemtechnologien (kurz: MST) für die Massenfertigung prüfen zu lassen.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird ein völlig neues Konzept für die Realisierung dieser kleinen Induktivitätsbauformen vorgestellt, mit dem sich eine Vielzahl von Spulen, integriert in einen Fertigungsnutzen¹, parallel verarbeiten lässt.

Kern dieses Verfahrens stellt die photolithographische Abbildung einer Galvanoform auf den Spulenkörpern dar. Dabei werden die Spulenwindungen durch einen elektrochemischen Abscheideprozess additiv in dieser Galvanoform erzeugt. Für die galvanische Kupferabscheidung muss der Nutzen vor der Photolithographie ganzflächig dünn metallisiert werden. Diese Startmetallisierung wird im Bereich zwischen den Windungen wieder entfernt, weshalb das Verfahren als Semi-Additivtechnik bezeichnet wird.

Damit dieses Verfahren auf quaderförmige Spulenkörper angewendet werden kann, muss für alle Prozessschritte das Problem der homogenen Schichtabscheidung gelöst werden. Dies bereitet besonders auf scharfen Kanten und Ecken Schwierigkeiten, weshalb die Spulenkörperkanten verrundet werden müssen. Darüber hinaus müssen physikalische, stark anisotrope Abscheideverfahren durch chemische und elektrochemische Verfahren ersetzt werden. Die Flächenmetallisierung wird stromlos chemisch mittels Palladiumbekeimung abgeschieden und galvanisch auf eine Metallisierungshöhe von 0,5 μm verstärkt. Diese Mindestdicke ist für ein homogenes Abscheiden des Photolacks und der Spulenwindungen erforderlich. Für das Belackten des Nutzens erweist sich die elektrophoretische Lackierung im Vergleich zu Tauch- und Sprühlackierung als ideal geeignet. Auf diese Weise erhält man eine ganzflächige Lackierung einschließlich aller Ecken und Kanten mit einer Schichtdickenhomogenität von $\pm 2 \mu\text{m}$. Es zeigt sich, dass beim Aushärten der Lackierung die Schichtdickenhomogenität aufgrund des Lackrückflusses von Bereichen mit höherer Flächenkrümmung hin zu Bereichen mit geringerer Flächenkrümmung wieder verloren geht. Dies führt dazu, dass die Lackdicke auf den Spulenkörperkanten weniger als 2 μm beträgt. Deshalb muss das Aushärten der Lackierung durch einen Softbake im Vakuum ersetzt werden. Dabei wird gezeigt, dass die Lackeigenschaften im Hinblick auf Kantensteilheit und Photolackhaftung durch diese Form des Softbakes ausreichend gut für die Erzeugung der Galvanoform bleiben.

¹ Substrat mit integrierten Spulenkörpern

Alternativ zu den quaderförmigen Spulenkörpern werden auch zylinderförmige Spulenkörper verwendet. Diese lassen sich aufgrund der gleichmäßigen Oberflächenkrümmung auch bei hohen Aushärtungstemperaturen sehr homogen belackten. Allerdings wird bei einem kreisförmigen Spulenquerschnitt der Lichtweg durch den Photolack entlang der Seitentante an den Spulenkörper so groß, dass der Lack nur für relativ kleine Bauformen in diesem Bereich komplett belichtet werden kann.

Die konkurrierenden Anforderungen der homogenen Beschichtung und der ausreichenden Belichtung werden bei der neuen Substratgeneration mit einer Kantenverrundung mit 70 µm Radius berücksichtigt.

Damit sich die belackten Spulenkörper lithographisch auf Standardbelichtungsmaschinen strukturieren lassen, müssen vertikale Bauelementflanken im Nutzen vermieden werden. Dazu werden die quadratischen Spulenkörper um 45° zur Nutzenoberfläche gedreht. Somit erreichen die annähernd parallelen Lichtstrahlen in einem doppelseitigen Lithographieprozess alle vier Seitenflächen des Spulenkörpers.

Allerdings tritt hierbei das Problem auf, dass sich die meisten Bereiche der Spulenkörperoberfläche nicht im Kontakt belichten lassen, sondern teilweise einen erheblichen Abstand zur Lithographiemaske aufweisen. Der maximale Proximityabstand tritt an der Spulenkörperseitenkante auf und beträgt das $1/\sqrt{2}$ -fache der Breite des Bauelements. Dieser Proximityabstand reduziert die minimale Strukturgröße aufgrund der Beugungs- und Divergenzeffekte erheblich.

Um einen homogenen Windungsquerschnitt zu erzielen, müssen die Divergenzeffekte der Belichtungsmaschine in der Lithographiemaske korrigiert werden. Dabei kann gezeigt werden, dass dies möglich ist, solange die Kompensationsstrukturen in der Lithographiemaske größer als die beugungsbedingte minimale Strukturbreite bleiben.

Die Wirkungsweise der beugungsreduzierenden D-Optik ist für große Abstände zur Lithographiemaske aufgrund der dadurch erhöhten Lichtstrahldivergenz eher hinderlich als hilfreich, weshalb sie für die Laborexperimente ausgebaut wurde. Für die Massenfertigung wird eine LEGO-Optik von der Fa. Karl Süss empfohlen, mit der sich auf der 1,0 mm langen Spulenbauform 0402 dieselben Strukturgrößen wie mit dem Laserwindeln erzeugen lassen.

Die Verwendung eines niederenergetischen Excimer Lasers für die Belichtungsexperimente zeigt, dass sich mit alternativen, nahezu divergenzfreien Lichtquellen Strukturgrößen nahe an der theoretischen Beugungsgrenze realisieren lassen.

Die mit der Semi-Additivtechnik hergestellten Spulen werden bis 3,0 GHz mit einem Netzwerkanalysator vermessen und mit industriell gefertigten Spulen derselben Baugröße verglichen. Dabei zeigt sich, dass der Widerstand der MST-Spulen für hohe Frequenzen deutlich geringer ansteigt als der Widerstand der industriellen Referenzproben. Ebenso ist die maximale Güte der MST-Spulen etwa um den Faktor Zwei besser als bei den Referenzproben. Dies ist letztendlich darauf zurückzuführen, dass man mit dem MST-Verfahren durch die photolithographisch erzeugte Galvanoform und die elektrochemische Differenzätzung einen homogenen Windungsquerschnitt und eine wesentlich glattere Windungsoberfläche erzielen kann.

Jeder einzelne Prozessschritt, von der stromlos chemischen Flächenmetallisierung bis zum Verzinnen der Lötflächen, ist für die kostengünstige Massenfertigung im sogenannten 'Batch-Betrieb' oder im Bandbetrieb geeignet. Für die Massenfertigung der Spulenkörper im steifen Gefüge wird ein völlig neuer Weg der Spulenkörperfertigung eingeschlagen, bei dem ein hochtemperaturbeständiger LCP-Kunststoff als Basismaterial fungiert und eine Hybridtechnik, die ein Metallband aus Bronze als Trägermaterial nutzt, angewandt wird. In die einzelnen Aussparungen des Metallträgerstreifens werden kleine Verbände von Spulenkörpern mittels Spritzguss abgeformt, die bei dem derzeit angefertigten Musterwerk-

zeug 20 Spulenkörper beinhalten. Bei den Abmessungen werden auf diese Weise die Fertigungstoleranzen von bisher 0,05 mm für die Aluminiumoxid-Spulenkörper auf knapp 0,02 mm reduziert. So entsteht ein Gefüge, das in xy-Richtung bei geringsten Fertigungstoleranzen eine hohe Steifigkeit aufweist, aber in z-Richtung aufgrund der Elastizität des Metallträgerstreifens flexibel bleibt und auf eine Spule mit großem Radius gerollt werden kann. Die einzelnen Spulen durchlaufen so die gesamte Fertigung in einem langen Band.

Somit lässt das entwickelte Verfahren erwarten, dass bei niedrigeren Fertigungskosten Induktivitäten mit höherer Güte produziert werden können.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Grundlagen für die Herstellung und Charakterisierung	4
2.1 Anforderungsprofil und Kenngrößen miniaturisierter Induktivitäten	4
2.1.1 Technologie der Oberflächenmontage.....	4
2.1.2 Herstellungsverfahren für SMT-Induktivitäten.....	10
2.1.3 Elektrische Kenngrößen realer Induktivitäten.....	12
2.2 Erzeugung miniaturisierter 3D-Strukturen	17
2.2.1 LIGA-Verfahren.....	17
2.2.2 Semi-Additivtechnik.....	20
2.2.3 Mikrosystemtechnische Herstellung von SMT-Induktivitäten.....	22
3. Nutzenfertigung	24
3.1 Anforderungen an das Substratmaterial	25
3.2 Technische Keramiken	26
3.3 Hochtemperaturbeständige Kunststoffe	29
3.3.1 Beurteilung der Wärmeformbeständigkeit.....	29
3.3.2 Überblick über temperaturbeständige Kunststoffe.....	31
3.3.3 Technische Kunststoffe für SMT-Substrate.....	33
3.4 Substratdesign	38
3.4.1 Anforderungen in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Prozesstechnik.....	38
3.4.2 Technische Realisierung der Nutzenfertigung.....	44
3.5 Nutzenfertigung von Labormustern mittels Laserablation	47
4. Technologie der Mikrostrukturabformung	51
4.1 Flächenmetallisierung	51
4.1.1 Metalle als Startmetallisierung.....	52
4.1.2 Abscheideverfahren für nicht-planare Substrate.....	54

4.2	Photolithographische Erzeugung der Galvanoform	56
4.2.1	Photolacke	56
4.2.2	Elektrophoretische Lackierung mit dem Eagle 2100	58
4.2.3	Prebake mit minimiertem Photolack-Reflow	61
4.2.4	Belackung und Belichtung auf runden Spulenkörpern	65
4.2.5	Photolackbelichtung auf nicht-planaren Substraten	67
4.3	Excimer Laser-Photolithographie	76
4.3.1	Experimenteller Aufbau	76
4.3.2	Lithographie mit ultradickem Photolack	78
4.3.3	Lithographie auf nicht-planaren Substraten	79
4.4	Abformung der Leiterbahnen	81
4.4.1	Galvanische Kupferabscheidung	81
4.4.2	Freistellen der Leiterbahnen	86
4.5	Dielektrische Passivierung	88
4.5.1	Isolationsschicht mit Durchkontakten	88
4.5.2	Schutzpassivierung	90
5.	Elektrische Charakterisierung	94
5.1	Messaufbau und Auswertung	94
5.1.1	Streuparameter	94
5.1.2	Messaufnehmer und Messplatzkalibrierung	97
5.2	Demonstratoren in Planartechnik	101
5.3	Demonstratoren in 3D-Technik	105
6.	Fazit und Ausblick	110
7.	Literaturverzeichnis	113
8.	Anhang	122
	Danksagung	126

1. Einleitung

Die aktuellen Entwicklungen auf dem Sektor der elektronischen Bauteile und Komponenten werden insbesondere durch die fortschreitende Miniaturisierung bestimmt. Dahinter verbirgt sich das Bestreben, die Marktakzeptanz eines Produktes durch kleinere Bauformen, mehr Funktionalität und niedrigere Kosten zu verbessern.

Grundsätzlich lässt sich die Miniaturisierung durch einen höheren Integrationsgrad erreichen. Im Extremfall ist dann die gesamte Baugruppe als monolithische Schaltung oder als IC in Siliziumtechnologie realisiert. Da aber die einzelnen Produktmodelle mit Laufzeiten von einem Jahr sehr kurzlebig sind, steht der Entwicklungs- und Fertigungsaufwand für einen komplett integrierten Schaltkreis nicht mehr in Relation zur Produktlaufzeit und zum Endverkaufspreis. Aufgrund der erforderlichen Flexibilität zum schnellen Umstellen auf ein neues, leicht abgewandeltes Produktmodell muss nach wie vor ein bestimmter Teil der Baugruppe mit diskreten Bauelementen aufgebaut werden. Der Markt für miniaturisierte, diskrete Bauelemente ist demzufolge ein starker Wachstumsmarkt.

Um die weitere Miniaturisierung von diskret aufgebauten Schaltkreisen zu ermöglichen und um die automatische Fertigung von bestückten Platinen zu rationalisieren, wurde die Platinenfertigung mit bedrahteten Bauelementen Schritt für Schritt durch die Technologie der Oberflächenmontage (kurz: SMT¹) ersetzt. Diese vereinfacht die weitere Verkleinerung der Einzelbauteile und ermöglicht die beidseitige Bestückung von Platinen mit hoher Packungsdichte. Die SMT-Technik wird seit Beginn der achtziger Jahre in nahezu allen Bereichen der Elektronik angewendet. Dadurch wurde der größte Beitrag zur Verkleinerung von elektronischen Geräten geleistet; kleine und kompakte Massenprodukte mit hoher elektronischer Packungsdichte wie Laptop-Rechner und Mobiltelefone sind erst durch die SMT-Technik möglich.

In der Computertechnologie erfordert die Entwicklung von leistungsfähigeren Prozessoren und Speicherbausteinen vorrangig die Miniaturisierung von integrierten Schaltkreisen und ihren aktiven Komponenten. Für die drahtlose Kommunikation mit Handy, Pager usw. liegt die Priorität dagegen bei der Miniaturisierung der diskreten passiven Bauelemente. Wie Tabelle 1.1 verdeutlicht, liegt der Grund dafür in ihrem vergleichsweise großen Anteil z.B. in einem Mobiltelefon.

	<i>Enthaltene Bauelemente</i>	<i>Anzahl</i>
	ICs	12
	Diskrete aktive Komponenten	16
	Diskrete passive Komponenten	214
	Andere	8
	Gesamt	250

Tab. 1.1: Anzahl der elektronischen Bauelemente in einem Mobiltelefon [00S2]

¹ SMT = Surface Mount Technology

Die Verkaufszahlen bei Widerständen, Kondensatoren und Induktivitäten sind deutlich größer als bei allen anderen SMT-Bauteilen. Dabei entfallen auf 21 ausgelieferte Widerstände nur drei Kondensatoren und lediglich eine Induktivität. Diese Bauteile unterliegen einem starken Preisverfall und damit bei niedrigen Preisen² permanenter Minimierung der Fertigungskosten.

Die kleinsten SMT-Widerstände und Kondensatoren haben heute eine Länge von 0,5 mm. Bei den Induktivitäten wird diese Bauform noch nicht gefertigt. Hier hat derzeit die kleinste Bauform eine Länge von 1,0 mm. Abbildung 1.1 zeigt die heute gängigen Bauformen für SMT-Induktivitäten.

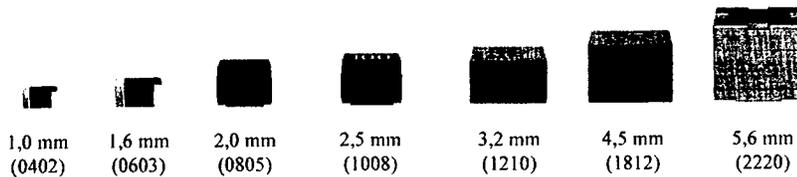


Abb. 1.1: Länge (Bauform entsprechend EIA-Norm) der gängigsten SMT-Induktivitäten [99E2]

Bei den Induktivitäten wird in Europa derzeit die Bauform 1210 mit einer Länge von 3,2 mm am häufigsten verkauft. Dieses Absatz-Maximum verschiebt sich aber alle paar Jahre zur nächst kleineren Bauform. Die beiden kleinsten Bauformen aus Abbildung 1.1 werden zu etwa 80 % in Mobiltelefonen eingesetzt. In einem Mobiltelefon findet man um die 20 Induktivitäten, weshalb das Weltmarktvolumen für die kleinste dargestellte Bauform im Jahr 2000 bei stark steigendem Bedarf über 10 Milliarden Stück betrug.

Bis hinunter zur Baugröße 0805 werden die Induktivitäten seriell mit der klassischen Drahtwickeltechnik hergestellt. Für kleinere Bauformen stößt die Wickeltechnik an ihre Grenzen und wird so aufwändig und teuer, das die Gewinnspanne für die Hersteller mit diesem Verfahren zu gering wird. Die meisten alternativen Herstellungsverfahren wie beispielsweise das Laserwendeln sind ebenfalls serielle Verfahren, für die eine Miniaturisierung über die Bauform 0402 hinaus mit technischen Problemen verbunden ist.

Die Fertigungskosten lassen sich reduzieren, wenn bei jedem Prozessschritt möglichst viele Spulen gleichzeitig verarbeitet werden. Eine solche Verarbeitung wird in der Halbleiterindustrie als Batch-Prozessierung bezeichnet, wobei hier aus einem prozessierten Siliziumwafer mehrere hundert Einzelchips entstehen. Da sich die Mikrosystemtechnik die Verfahren der Halbleiterindustrie zu Nutze macht, sind die angewandten Prozesse in der Regel für eine Batch-Prozessierung bestens geeignet und unterstützen zugleich die weitere Miniaturisierung.

Ziel dieser Arbeit ist es, mit den Methoden der Mikrosystemtechnik ein möglichst kostengünstiges Verfahren für die Herstellung von SMT-Induktivitäten der Baugröße 0402 (kleinste dargestellte Bauform in Abbildung 1.1) zu präsentieren, welches eine Batch-Prozessierung erlaubt und mit dem sich auch die nächst kleineren Bauformen herstellen

² Widerstand \approx 0,2 Pfennige; Induktivität \approx 2 Pfennige

lassen. Das Prinzip der Leiterbahnerzeugung bei diesem Verfahren wird als Semi-Additivtechnik bezeichnet. Die wesentlichen Prozessschritte sind die Photolithographie und die galvanische Metallabscheidung.

Um das Verfahren in die Fertigung umzusetzen, muss es allerdings gelingen, die Spulenkörper mit einer hohen Maßgenauigkeit in einem steifen Verband, bezeichnet als Fertigungsnutzen bzw. Substrat, anzuordnen. Anderenfalls können die Toleranzen für die elektrischen Kenngrößen bei gleichzeitig geringem Produktionsausschuss nicht eingehalten werden. Für die Massenfertigung der Substrate wird deshalb ein geeignetes, prozessverträgliches Material sowie ein hybrides Substratdesign für die Spritzgussfertigung präsentiert, nach dem derzeit die ersten Muster hergestellt werden.

Erstmals wird hier die Verwendung eines Verfahrens der Mikrosystemtechnik für die Massenproduktion eines elektronischen Bauteils angedacht, und es ist möglich, dieses Verfahren innerhalb der nächsten drei Jahre in die Fertigung zu implementieren.

2. Grundlagen für die Herstellung und Charakterisierung

In diesem Kapitel wird zunächst das Anforderungsprofil für miniaturisierte elektronische Bauelemente skizziert. Daraufhin werden die elektrischen Kenngrößen für reale Spulen abgeleitet und der Stand der Technik für die Herstellung von Induktivitäten kleiner Bauform wie auch für die Erzeugung von dreidimensionalen Strukturen in der Mikrosystemtechnik beschrieben.

2.1. Anforderungsprofil und Kenngrößen miniaturisierter Induktivitäten

Miniaturisierte Induktivitäten findet man heute in integrierten Schaltkreisen, wobei diese Spulen in planarer Siliziumtechnologie realisiert werden [00T2], [00L1]. In deutlich größerer Stückzahl finden sie als diskrete Bauelemente Verwendung, die sich auf eine Platine oder auf einem hybriden Schaltkreis montieren lassen. Diskrete Induktivitäten kleiner Bauform werden, ebenso wie alle anderen passiven und aktiven elektrischen Komponenten, ausschließlich in Bauformen für die Oberflächenmontage (kurz: SMD¹) hergestellt. Im Folgenden werden die Anforderungen aufgezeigt, die die Technologie der Oberflächenmontage an ein Bauelement stellt.

2.1.1 Technologie der Oberflächenmontage

Im Gegensatz zu den bedrahteten Bauelementen (kurz: THMD²) wird der elektrische Kontakt zwischen dem SMD-Bauteil und den Leiterbahnen auf der Bauelementseite der Platine hergestellt (Abbildung 2.1). Für die Oberflächenmontage werden die SMDs vor dem eigentlichen Lötprozess entweder durch Kleber oder Lötpaste vorfixiert und anschließend durch Reflow- oder Schwallbadlöt elektrisch kontaktiert und zugleich endfixiert [89N1]. In Abhängigkeit von Platinenmaterial, Bestückungsart und Bauelementgröße unterscheiden sich die Verfahren für die Vorfixierung und die elektrische Kontaktierung.

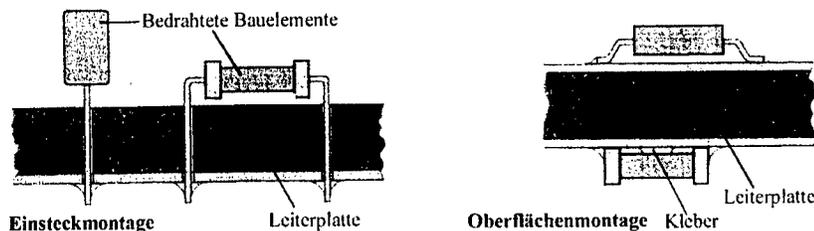


Abb. 2.1: Einsteckmontage und Oberflächenmontage von elektronischen Bauelementen

¹ SMD = Surface Mount Device

² THMD = Through Holes Mount Device

Die Oberflächenmontage von Bauelementen bietet zwei wesentliche Vorteile [91K1]: Zum Einen lassen sich die Bauelemente durch den Wegfall der Anschlussdrähte wesentlich einfacher miniaturisieren, und zum Anderen können Platinen doppelseitig bestückt werden. Beides zusammen führt dazu, dass sich die Dimensionen von Baugruppen heute um bis zu 70 % gegenüber der THMD-Technik reduzieren lassen. Diese Flächeneinsparung wirkt sich entsprechend auch im Gewicht einer Flachbaugruppe aus.

Neben dem Miniaturisierungsaspekt bietet die SMT auch fertigungstechnische Vorteile: Die Bestückung der Platinen vereinfacht sich und kann leichter automatisiert werden, da die Fertigungsschritte Bohren der Einstecklöcher sowie Biegen und Schneiden der Anschlussdrähte entfallen.

Ein weiterer Vorteil, der zunehmend an Bedeutung gewinnt, sind die verbesserten Hochfrequenzeigenschaften der SMDs, da parasitäre Streuinduktivitäten und -kapazitäten durch die Oberflächenmontage stark reduziert werden.

Allerdings stellt die hohe Packungsdichte und Miniaturisierung der Baugruppen in SMT deutlich höhere Anforderungen an die Layouterstellung, da die Oberflächenmontage weniger Flexibilität bei der Kontaktierung zuläßt und Leiterbahnen nicht mehr beliebig unter den Bauelementen durchgeführt werden können. Die hohe Packungsdichte führt zu verstärkter Wärmeentwicklung, was im Design und in der Auslegung von Baugruppen berücksichtigt werden muß.

Eine manuelle Bestückung der SMDs ist nur in Ausnahmefällen möglich bzw. wirtschaftlich. Die miniaturisierten SMDs sind kaum beschriftet, weshalb die Verwechslungsgefahr groß ist. Die Reparatur von Baugruppen ist durch die Miniaturisierung mittlerweile so aufwändig geworden, dass defekte Baugruppen in der Regel durch neue ersetzt werden.

Baugrößen und Abmessungen

Passive SMT-Einzelbauteile wie Widerstände, Kondensatoren und Induktivitäten sind als quaderförmige Chips oder in zylindrischer MELF¹-Ausführung erhältlich, wobei die Ausführung als Chip aufgrund der fertigungstechnischen Vorteile immer mehr dominiert [88S1]. Die Chip-Baugröße ist mit einer vierstelligen Zahl codiert. Dieser Zifferncode ist unterschiedlich, je nachdem ob er sich an der amerikanischen EIA-Norm oder an der Europa-Norm EN bzw. IEC orientiert.

Die ältere amerikanische Norm gibt die maximale Länge und Breite in Hundertstel Zoll an. Die ersten beiden Ziffern entsprechen der Länge und die letzten beiden der Breite. Die Bauform 0402 stellt heute die kleinste handelsübliche Bauform für Induktivitäten dar. Es wird aber bereits intensiv an den Fertigungsverfahren für die nächst kleinere Bauform 0201 gearbeitet, wozu diese Arbeit beiträgt; das hier präsentierte Fertigungsverfahren zielt auf die Chip-Bauform 0402, ist aber für kleinere Bauformen noch besser geeignet. Die Dimensionen für die Bauform 0402 ergeben sich wie folgt:

$$\text{Länge} \times \text{Breite} = 4 \cdot \frac{1''}{100} \times 2 \cdot \frac{1''}{100} = 1,0 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm} \quad (2.1)$$

Im IEC-Normentwurf werden die Dimensionen in Zehntelmillimeter verschlüsselt, weshalb die EIA-Bauform 0402 der IEC/EN-Bauform 1005 entspricht. Diese Bauform wird bei den meisten Firmen mit Abmessungstoleranzen von 5 % gefertigt.

¹ MELF = Metal Electrode Face Bonding

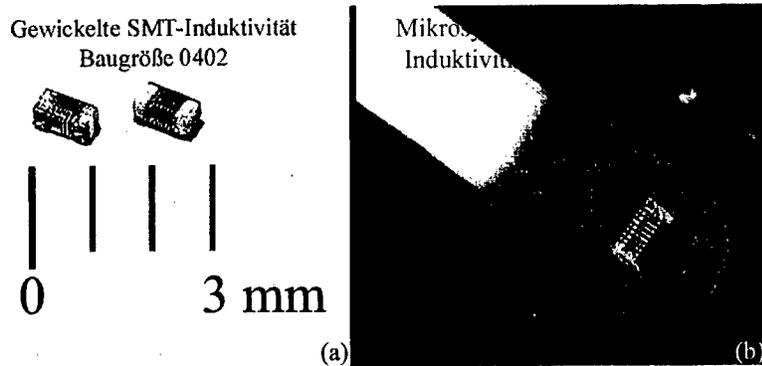


Abb. 2.2: Spulen der EIA-Bauform 0402:
 a) Kleinste gewickelte SMT-Induktivität [99C1]
 b) Im Rahmen der Arbeit realisierte MST-Induktivität dieser Bauform

In Tabelle 2.1 sind die Dimensionen für die kleinsten SMT-Chipbauformen und für die zylindrischen MELF-Bauformen zusammengestellt. Das mikrosystemtechnische Herstellungsverfahren kann auch auf zylindrische Bauformen angewendet werden. Von den Dimensionen kommt aber nur die MIKROMELF-Bauform für das MST-Verfahren in Frage.

	Bauform	Bemerkung	Abmessungen [mm]
Chip	0603	EIA-Norm	1,6 × 0,8 × 0,8
	0402	EIA-Norm	1,0 × 0,5 × 0,5
	0201	EIA-Norm	0,5 × 0,3 × 0,3
MELF	MELF	DIN 0207, meist Dioden	∅ 2,2 × 5,5
	MINIMELF	DIN 0204, meist Widerstände	∅ 1,4 × 3,6
	MIKROMELF	DIN 0102	∅ 1,27 × 2,0

Tab. 2.1: Abmessungen der kleinen Chip- und MELF-Bauformen [98H2]
 Das MST-Verfahren kann für die grau markierten Bauformen angewendet werden.

Verpackungsformen

SMD-Einzelbauelemente werden als Schüttgut oder im Gurt angeliefert, integrierte Schaltkreise dagegen vorwiegend in Stangen-, Flächen- oder Stapelmagazinen. Die Verpackungsart wird dabei durch den Bestückungsautomaten bestimmt, wobei eine Normung der maschinenspezifischen Magazine bislang nicht existiert.

Am weitesten verbreitet sind heute Gurte, da sie eine verwechslungssichere und transportgeschützte Verpackung bieten. Man unterscheidet hier die zwar preiswerten, aber dafür relativ steifen Pappgurte von den Blistergurten. Diese sind Kunststoffbänder mit eingepprägten Nestern, die mit einer Abdeckfolie verschlossen sind (Abb. 2.3). Die zukünftige Entwicklung geht in Richtung Schüttgut, da sich hier die Fertigungskosten nochmals dra-

stisch reduzieren lassen, was allerdings zusammen mit der Miniaturisierung hohe technische Anforderungen an die Bestückungsautomaten stellt.

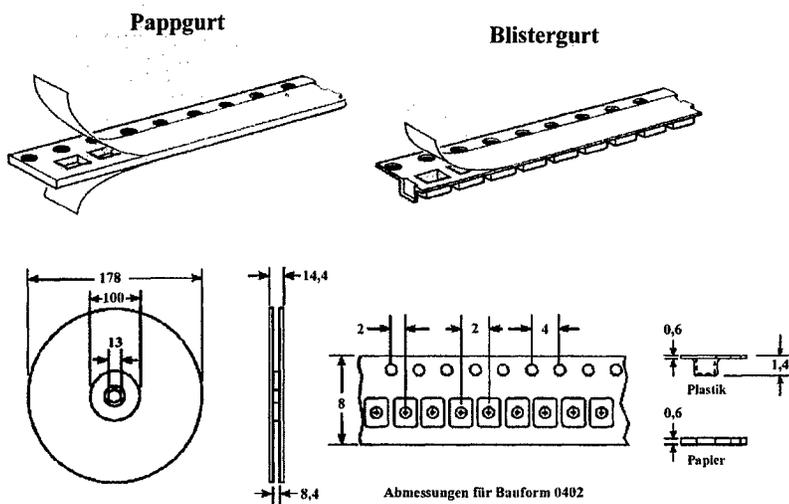


Abb. 2.3: Papp- und Blistergurt für die Verpackung von SMDs [00C1]
Die Abmessungen sind in mm für die Bauform 0402 angegeben.

Lötbarkeit

Die Lötbarkeit von Bauteilen hat zur Voraussetzung, dass sich die Anschlüsse bei den geforderten Lötbedingungen mit dem Lot gut benetzen lassen. Deshalb sind die Lötkontakte in der Regel mit einer Zinn-Blei-Legierung (typisch: $\text{Sn}_{60}\text{Pb}_{40}$) verzinnt. Da Blei aus Gründen des Umweltschutzes mittelfristig keine Verwendung mehr in der Elektronikindustrie finden soll, werden die Lötkontakte neuerdings mit Reinzinn überzogen. Um die Diffusion zwischen der Zinn-Blei-Schicht bzw. Zinnschicht und der Grundmetallisierung (für Induktivitäten: Kupfer) und die damit verbundene Verringerung der Lötbarkeit zu verhindern, wird diese durch eine Diffusionssperre, üblicherweise eine mindestens $1 \mu\text{m}$ dicke Nickelsperre, geschützt. Dies verlängert die Lötbarkeit der Bauteile z.B. bei Raumlagerung auf mehr als ein Jahr.

Lotpaste

Die Lotpaste setzt sich aus dem Lotpulver (etwa 90 % Gewichtsanteil) und organischen Substanzen zusammen, die als Fluss- und Lösungsmittel zur Einstellung der gewünschten Viskosität dienen. Das eigentliche Lot ist eine Metalllegierung mit Zinn als Hauptkomponente und normalerweise einem oder mehreren Zusätzen wie z.B. Blei, Silber, Kupfer, Antimon oder Wismut. Das Eutektikum der Lotlegierung, das sich durch einen niedrigen

Schmelzpunkt und ein schnelles Erstarren auszeichnet, wird nur bei einer bestimmten stöchiometrischen Zusammensetzung erreicht, andernfalls besitzt die Legierung einen Schmelzbereich. Der Schmelzpunkt des Zinn-Blei-Eutektikums $\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$ beträgt $183\text{ }^{\circ}\text{C}$. Am weitesten verbreitet zur Bleiverzinnung von Leiterplatten und Bauelementen ist die Zinn-Blei-Legierung $\text{Sn}_{60}\text{Pb}_{40}$ mit einem Schmelzbereich von $183\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $188\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dieses Weichlot ist allerdings relativ grobkristallin und deshalb mechanisch nur gering belastbar, weshalb in der Hybridtechnik und Oberflächenmontage häufig die feinkörnigere Legierung $\text{Sn}_{62}\text{Pb}_{36}\text{Ag}_2$ mit einem Schmelzpunkt von $189\text{ }^{\circ}\text{C}$ verwendet wird, die aber mit höheren Kosten verbunden ist.

Die Löttemperatur selbst liegt in der Regel um mindestens $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ höher als der Schmelzbereich. Beim Wellenlöten werden SMT-Bauelemente einer kurzzeitigen Temperaturbelastung von $260\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ für 10 sec ausgesetzt.

Wie bei der Verzinnung der Lötkontakte werden auch bei den Lötten bleifreie Produkte angestrebt, weshalb die Entwicklung in Richtung Zinn-Kupfer-, Zinn-Silber- und Zinn-Silber-Kupfer-Legierungen geht. Die Schmelztemperaturen liegen hier um etwa $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ höher als bei bleihaltigen Lotpasten. Damit sind bei bleifreiem Wellenlöten Löttemperaturen bis $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ zu erwarten. Die höheren Temperaturbelastungen sind natürlich mit höheren Anforderungen an die Temperaturfestigkeit der SMT-Bauteile verbunden. Tabelle 2.2 gibt einen Überblick über die bisher üblichen Zinn-Blei-Legierungen und über die aktuellen bleifreien Lotpasten.

	Metallpulver	Bereich der Schmelze
Mit Blei	$\text{Sn}_{63}\text{Pb}_{37}$	$183\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$\text{Sn}_{60}\text{Pb}_{40}$	$183\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $188\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$\text{Sn}_{62}\text{Pb}_{35,4}\text{Ag}_2\text{Sb}_{0,35}\text{Bi}_{0,25}$	$177\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $189\text{ }^{\circ}\text{C}$
Bleifreie Lotpaste	Sn	$232\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$\text{SnCu}_{0,7}$	$227\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$\text{SnAg}_{3,5}$	$221\text{ }^{\circ}\text{C}$
	$\text{SnAg}_{3,8}\text{Cu}_{0,7}$	$217\text{ }^{\circ}\text{C}$

Tab. 2.2: Schmelztemperatur von handelsüblichen Lotpasten mit und ohne Bleizusatz [01E1]

Industrielle Lötverfahren für SMDs

Bei den industriellen Lötverfahren für SMDs unterscheidet man zwischen Flow- und Reflowlöten. Beim Flowlöten wie z.B. beim insbesondere für bedrahtete Bauelemente eingesetzten Schwallbadlöten wird das Bauteil ins flüssige Lot eingetaucht, was für SMD-Bauteile eine Vorfixierung durch Kleber notwendig macht. Dagegen werden die SMD-Bauelemente beim Reflow-Löten mit der Lotpaste auf der Platine und beim Aufschmelzen des Lots durch die Oberflächenspannung auf den Löt pads zentriert (Abbildung 2.4).

➤ Flowlöten:

Die Kombination SMD und Flowlöten wird als Schwalllöten für beidseitige SMD-Bestückung von Flachbaugruppen genutzt. Dabei wird die Platine tangential über den von einer Pumpe erzeugten Lotschwall geführt, wobei die aufgeklebten SMDs vollständig ins Lot eintauchen. Die Lotbadtemperatur beträgt etwa $250\text{ }^{\circ}\text{C}$ und die Kontaktzeit liegt zwischen 1 sec und 3 sec. Problematisch bei diesem Verfahren ist, dass manche Kontaktstellen durch die Bauelemente selbst abgeschattet werden. Ein besseres Ergebnis für SMD-Bauelemente kann mit Doppelwellenlötanlagen erreicht wer-

den. Mit der ersten, turbulenten Welle werden Gasblasen weg gerissen und kritische Stellen erreicht. Mit der zweiten, weichen Welle wird der Lotüberschuss abgetragen.

- **Reflow-Löten:**
 Das Reflow-Löten ist als Verfahren speziell für die SMT entwickelt worden. Dabei werden beim Bestücken die SMD-Bauelemente von der Lotpaste auf die Platine vorfixiert. Im eigentlichen Lötprozess wird dann die Lotpaste aufgeschmolzen und so die metallische Verbindung hergestellt. In Abhängigkeit vom Aufschmelzprozess unterscheidet man zwischen Heizplatten-, Infrarot-, Laser-, Dampfphasen-Löten usw. Die größte Bedeutung hat das Infrarot-Reflowlöten, wobei hier die Platine mit Infrarotflächenstrahlern (Wellenlänge: 4 bis 6,5 μm) auf Löttemperatur gebracht wird. In diesem Wellenlängenbereich absorbiert die Luft die Infrarotstrahlung am besten, weshalb neben der Strahlungswärme die Konvektionswärme zum Aufheizen beiträgt und Abschattungseffekte minimiert. Beim bleifreien Löten besteht die Tendenz zum Löten unter Schutzgas mit verstärkter Konvektion.

- Die Kombination von Flow- und Reflowlöten erfolgt insbesondere bei beidseitiger SMD- und Mischbestückung¹.

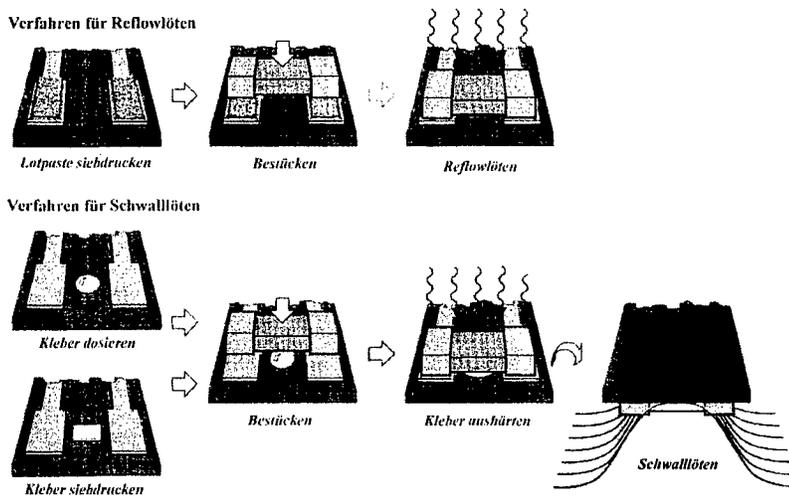


Abb. 2.4: Schematische Darstellung der Verfahren für Reflow- und Schwalllöten

¹ sowohl SMD- wie auch THMD-Bauelemente werden verwendet

2.1.2 Herstellungsverfahren für SMT-Induktivitäten

Bisher gängige Verfahren zur Herstellung von SMD-Induktivitäten der Baugröße 0402 sind die konventionelle Drahtwickeltechnik, die Multilayer-Chip-Technik, die Dünnschichttechnik sowie das Laserwendeln.

Drahtwickeltechnik

Bei der klassischen Wickeltechnik wird ein mit Kunstharz isolierter Kupferdraht auf den keramischen Spulenkörper gewickelt. Anschließend werden die Enden des Drahtes mit den elektrischen Anschlüssen galvanisch verbunden. Da die Dicke der Kupferdrahtisolierung nur etwa 2 bis 10 μm beträgt, kann bei diesem Verfahren das Wickelvolumen sehr gut ausgenutzt werden. Außerdem haben gezogene Kupferdrähte eine sehr gute Oberflächenqualität und gegenüber galvanisch abgeschiedenem Kupfer eine um knapp 20 % höhere Leitfähigkeit. So erzielt diese Fertigungsmethode die höchsten Güten. Gewickelte Induktivitäten der Baugröße 0402 werden bei der Fa. Coilcraft bis 47 nH mit Güten zwischen 38 und 77 bei 900 MHz gefertigt [99C2]. Allerdings lässt sich bei der Drahtwickeltechnik die weitere Miniaturisierung nur mit sehr hohem Aufwand realisieren und die Fertigungskosten sind bei diesem seriellen Verfahren relativ am höchsten.

Multilayer-Chip-Technik

Ein verbreitetes Herstellungsverfahren für die kleinen SMT-Induktivitäten ist die Multilayer-Chip-Technik. Bei diesem Verfahren werden u-förmige Leiterbahnen auf vorgebranntes keramisches Trägermaterial gedruckt (sog. Green-Sheet-Technik), das anschließend, jeweils um 90° gedreht, aufeinander geklebt wird. Damit ein durchgehender Strompfad entsteht, werden die Plättchen an den Enden der u-förmigen Leiterbahnen zu den darunter liegenden Schichten durchkontaktiert. Abbildung 2.5 zeigt den prinzipiellen Aufbau eines solchen Multilayer-Schichtstapels, der zum Schluss bei Temperaturen der Größenordnung 1000 °C zu einem monolithischen Chip gesintert wird.

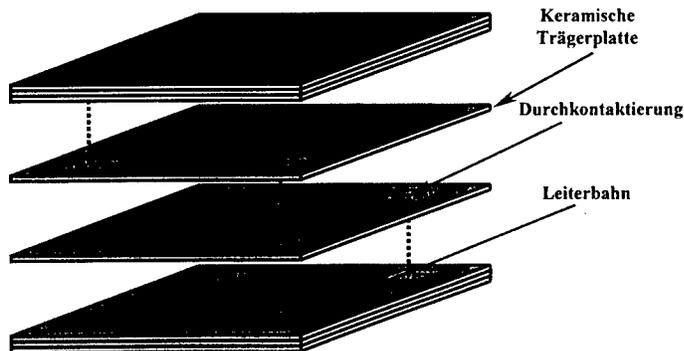


Abb. 2.5: Schichtstapel einer Multilayer-Chip-Induktivität in Green Sheet-Technik

Diese Technik ist für eine weitere Miniaturisierung gut geeignet. Auch sind Induktivitäten, die auf diese Weise hergestellt werden, sehr billig, da die Produktion mit Parallelfertigung

erfolgt. Im Vergleich zur gewickelten Bauform resultieren aber niedrigere Resonanzfrequenzen und geringere Güten. Multilayer-Chip-Induktivitäten der Baugröße 0402 werden bei der Fa. Componex bis 82 nH mit Güten zwischen 16 und 34 bei 800 MHz angeboten [00C2].

Dünnschichttechnik

Für die Fertigung der Bauform 0402 nutzen manche Hersteller die planare Dünnschichttechnik. Dabei wird in Additiv- oder Subtraktivtechnik eine Planarspule auf ein Keramiksubstrat aufgebracht und dieses in einen Körper der Baugröße 0402 eingegossen. Mit dieser Technik ist es zwar möglich, parallel und damit kostengünstig zu fertigen und dabei sehr kleine Induktivitätstoleranzen einzuhalten, aber aufgrund der hochohmigen Dünnschicht werden nur geringe Güten erreicht. Die Baugröße 0402 wird bei der Fa. Toka in Dünnschichttechnik bis 4,7 nH mit Güten zwischen 18 und 25 bei 800 MHz gefertigt [01T1].

Laserwendeln

Für die Spulenbauformen 0603 und 0402 existiert als neues Fertigungsverfahren das Laserwendeln: Der Keramikspulenkörper wird zunächst komplett 20 µm dick galvanisch verkupfert. Anschließend wird in diese Kupferschicht mit einem Laserstrahl eine Schraubelinie geschnitten, während der Spulenrohling um die Längsachse rotiert. Der Windungsabstand beträgt dabei z.B. 20 µm. Abbildung 2.6 zeigt eine Spule der Bauform 0603 nach dem jeweiligen Prozessschritt. Die Fertigungskosten sind geringer als für gewickelte Spulen, aber höher im Vergleich zur parallel gefertigten Multilayer-Spule. Ebenso liegen die elektrischen Eigenschaften zwischen denen der gewickelten und der Multilayer-Spulen. Mit abnehmender Baugröße stößt dieses Verfahren an technische Grenzen bei der Reduzierung der Schnittbreite und bei der Oberflächenqualität der Leiterbahn, weshalb im Hinblick auf noch kleinere Bauformen nach neuen Techniken gesucht werden muss. Lasergewendelte Induktivitäten der Bauform 0402 werden von der Fa. Panasonic bis 100 nH mit Güten zwischen 21 und 43 bei 800 MHz gefertigt [00P1].

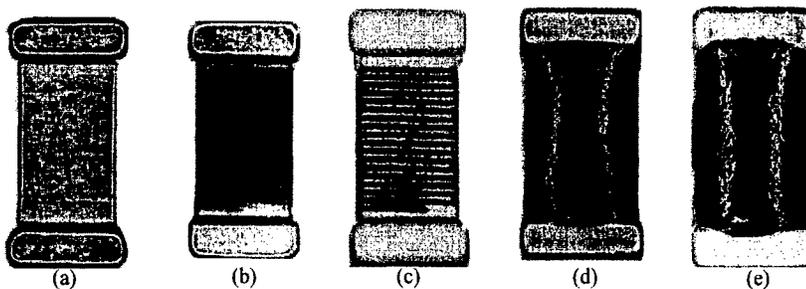


Abb. 2.6: Prozessschritte bei der Fertigung von Spulen der Baugröße 0603 mit Laserwendeln:
 a) Spulenkörper aus Aluminiumoxid; 20 µm dick galvanisch verkupfert,
 b) Subtraktive Erzeugung der Windungen durch Laserwendeln,
 c) Elektropolieren der Kupferwindungen,
 d) Schutzpassivierung,
 e) Verzinnen der Lötkontakte.

2.1.3 Elektrische Kenngrößen realer Induktivitäten

Die elektrischen Eigenschaften von Spulen dienen im Rahmen dieser Arbeit zur Beurteilung der technologischen Vor- und Nachteile des Herstellungsverfahrens. Sie werden im folgenden Abschnitt kurz zusammengestellt.

Induktivität

Die Induktivität L einer Spule beschreibt die direkte Proportionalität zwischen dem durch die Spule fließenden Strom I und dem dadurch erzeugten magnetischen Fluss ϕ [86M1].

$$L = \frac{\phi}{I} \quad (2.2)$$

Damit lässt sich für die in der Spule selbst induzierte Spannung aufgrund einer Änderung des magnetischen Flusses bzw. des durch die Spule fließenden Stroms schreiben [86M1]:

$$U = \frac{d\phi}{dt} = L \cdot \frac{dI}{dt} \quad (2.3)$$

Der Wert der Proportionalitätskonstante L wird zum Einen durch die Geometrie der Spule bzw. die Anordnung der Leiterbahnen und zum Anderen durch die Permeabilität des durchsetzten Mediums bestimmt.

Da nicht nur außerhalb, sondern auch innerhalb eines stromdurchflossenen Leiters magnetische Felder erzeugt werden, unterscheidet man zwischen der inneren und der äußeren Induktivität. Die innere Induktivität L_i ¹ ist bei Gleichstrom und bei niedrigen Frequenzen nicht vom Leiterquerschnitt abhängig und geht für hohe Frequenzen gegen Null, da hier aufgrund des Skin-Effektes die Ströme und damit die Magnetfelder aus dem Leiterinneren an die Leiteroberfläche verdrängt werden [68M1]. Für die folgenden Betrachtungen wird sie vernachlässigt und die Induktivität eines Leiters mit der äußeren Induktivität gleichgesetzt.

Eine gute Näherung für die äußere Induktivität L von Zylinderspulen liefert die Formel:

$$L = \alpha \cdot \left(\mu \cdot N^2 \cdot \frac{A}{l} \right) \quad (2.4)$$

wobei α der Formfaktor, $\mu = \mu_0 \mu_r$ die Permeabilität, N die Windungszahl, A die Querschnittsfläche und l die Länge der Spule ist.

Für die ideale, unendlich lange Zylinderspule und die geschlossene Ringspule hat der Formfaktor den Wert 1. Für alle anderen Spulen wird mit dem Formfaktor das Streufeld berücksichtigt. Für einlagig gewickelte Zylinderspulen kann man in guter Näherung den folgenden Ausdruck für den Formfaktor verwenden [82Z1]:

¹ Für die innere Induktivität gilt: $L_i [nH] = 0,5 \cdot \mu_r \cdot l [cm]$

$$\alpha = \frac{1}{1 + 0,45 \cdot \frac{D}{l}} \quad (2.5)$$

Dieser Formfaktor ist mit einem Fehler unter 1 % für kurze Spulen bis $D/l \leq 5$ gültig, wobei D der Durchmesser und l die Länge der Spule ist. Für die Spulenbauform 0402 gilt je nach Hersteller $0,45 < D/l < 0,55$.

Blindwiderstand

Der Begriff des induktiven Blindwiderstands resultiert aus dem Sachverhalt, dass in einer Induktivität ein Teil der elektrischen Energie in magnetische Feldenergie umgewandelt wird und somit einem Verbraucher nicht zur Verfügung steht. Wird eine Spule von einem harmonisch oszillierenden Wechselstrom $\underline{I}(t) = \underline{I} \cdot e^{j\omega t}$ durchflossen, so ergibt sich aus Gleichung (2.3) für die in der Spule induzierte Spannung [68M1]:

$$\underline{U}(t) = j \cdot \omega \cdot L \cdot \underline{I}(t) = \omega \cdot L \cdot \underline{I}(t) \cdot e^{j\frac{\pi}{2}} \quad (2.6)$$

Die Spannung der idealen Induktivität eilt dem Strom um $\frac{\pi}{2}$ voraus. In Analogie zum Ohmschen Gesetz definiert sich der induktive Blindwiderstand¹ wie folgt:

$$X_L := \left| \frac{U}{I} \right| = \omega \cdot L \quad (2.7)$$

Bei der realen Spule ist der Blindwiderstand nicht nur von L abhängig, und spezifiziert wird die effektive Induktivität:

$$L_{\text{eff}} = \frac{\text{Im}(Z)}{\omega} \quad (2.8)$$

Wirkwiderstand und Impedanz

Wie jeder Leiter besitzt die reale Induktivität neben ihrem induktiven Blindwiderstand einen Ohmschen Widerstand. Für den Gleichstromfall ergibt sich dieser aus dem spezifischen Widerstand des Leiters sowie aus dessen Querschnitt und Länge. Bei angelegter Wechselspannung wird der Widerstand durch den Skineneffekt [73K1] bestimmt, wobei sich hier zwei Grenzfälle unterscheiden lassen. Solange alle Querschnittsabmessungen kleiner als die Eindringtiefe bzw. Leitschichtdicke

¹ Bemerkung: Induktivitäten und Kapazitäten verhalten sich im mathematischen Sinne zueinander dual. Das Ersetzen von L durch $(\omega^2 \cdot C)^{-1}$ führt zur den dualen Gleichungen für den Kondensator [82Z1], [91B1].

$$\delta = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho}{\mu \cdot \omega}} \stackrel{\text{für Kupfer}}{=} \frac{16,8 \text{ cm}}{\sqrt{\omega [\text{Hz}]}} \quad (2.9)$$

bleiben, ist die Stromdichte analog zum Gleichstromfall über den Leiterquerschnitt konstant. Der Widerstand hat einen von der Frequenz unabhängigen Wert. Andernfalls kann man in guter Näherung annehmen, dass sich der effektive Leiterquerschnitt auf eine Schicht der Dicke δ entlang der Leiteroberfläche reduziert. Da sich der Widerstand umgekehrt proportional zur effektiven Querschnittsfläche und damit zur Eindringtiefe verhält, gilt für $\delta \ll$ Durchmesser des Leiters [82Z1]:

$$R \propto \sqrt{\omega} \quad (2.10)$$

Neben dem eigentlichen Skineneffekt werden die ohmschen Verluste durch folgende Effekte zusätzlich verstärkt [82Z1]:

- Wirbelströme: Durch das Eigenfeld der Spule werden in den Wicklungen und besonders in den großflächigen Lötkepappen Wirbelströme induziert, die zu zusätzlichen ohmschen Verlusten führen.
- Proximityeffekt: Die Nahwirkung der einzelnen Windungen sorgt analog zum Skineneffekt für zusätzliche Stromverdrängung. Wegen der Felder, die die Wicklungen gegenseitig aufeinander ausüben, wird der effektive Leitungsquerschnitt weiter verringert. Genauere Angaben über diese Verteilung sind meist nicht möglich, aber allgemein gilt, dass die maximale Stromdichte an Stellen der maximalen Feldkonzentration auftritt.
- Hysterese und magnetische Nachwirkung aufgrund der Permeabilität des Spulenkörpers führen zu weiteren, frequenzabhängigen Verlusten.
- Parasitäre Strompfade: Die Schutzpassivierung der realen Spule weist in der Regel eine geringe Leitfähigkeit auf, welche zu den Isolationsverlusten führt. Diese machen sich gerade bei miniaturisierten Spulen mit sehr dünnen Isolationsschichten bemerkbar.

Wirkwiderstand und Blindwiderstand werden mit dem Begriff der Impedanz zu einer komplexen Größe vereinigt:

$$\underline{Z} = R + j \cdot \omega \cdot L \quad (2.11)$$

Spezifiziert wird bei der realen Spule $\underline{Z} = \text{Re}(\underline{Z}) + j \cdot \text{Im}(\underline{Z})$. Dabei ist i.a. $\text{Re}(\underline{Z}) \neq R(\omega)$ und $\text{Im}(\underline{Z}) \neq \omega \cdot L$. Für $\mu = 1$ ist L unabhängig von ω .

Resonanzfrequenz

Bei einer realen Spule wirken benachbarte Leiterbahnabschnitte aufgrund ihrer Ausdehnung und den auftretenden Potenzialdifferenzen wie kapazitive Elemente. Diese Kapazitäts-

ten werden durch die Permittivität der Schutzpassivierung zusätzlich verstärkt. Da die kapazitiven Elemente i.a. deutlich kleiner sind als die induktiven, machen sie sich erst bei sehr hohen Frequenzen bemerkbar. Das Ersatzschaltbild der technischen Spule entspricht dann einer Verkettung von vielen Parallelschwingkreisen, was zu einem weiten Spektrum an Resonanzfrequenzen führt. Für das Ersatzschaltbild der technischen Spule bis zur ersten Resonanzfrequenz werden die Erd- und Wicklungskapazitäten zu einer einzigen parasitären Kapazität zusammengefasst. Der Wicklungswiderstand ist seriell und die Isolationsverluste sind parallel zur Induktivität geschaltet. Abbildung 2.7 zeigt das einfache Ersatzschaltbild bis zur ersten Resonanzfrequenz f_R .

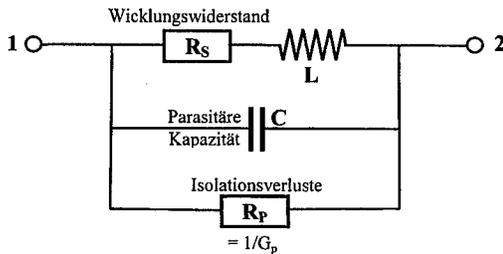


Abb. 2.7: Ersatzschaltbild der technischen Spule bis zur Grundresonanz f_R

Nach diesem Modell ergibt sich mit $R_p = \frac{1}{G_p}$ folgender Ausdruck für die Impedanz:

$$\frac{1}{Z} = G_p + j \cdot \omega \cdot C + \frac{1}{R_s + j \cdot \omega \cdot L} \tag{2.12}$$

Bei der Resonanzfrequenz kompensieren sich die induktiven und kapazitiven Blindwiderstände, d.h. der Imaginärteil der Impedanz verschwindet. Somit ergibt sich aus Gleichung (2.12) für die erste Resonanzfrequenz angenähert:

$$\omega_R = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \cdot \sqrt{1 - \frac{C}{L} \cdot R_s^2} \quad R_s \ll \sqrt{\frac{L}{C}} \approx \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \tag{2.13}$$

Für Frequenzen kleiner $f_R/10$ braucht die parasitäre Kapazität C nicht berücksichtigt werden. In der Nähe der Resonanzfrequenz bewirkt sie aber im Vergleich zur absoluten Induktivität L_0 einen überproportional starken Anstieg des Blindwiderstandes, weshalb die Induktivität der Spule vergrößert gemessen wird. Für eine verlustlose Spule gilt im Bereich $f < f_R$ [68M1], [91E1]:

$$L = \frac{L_0}{1 - \left(\frac{f}{f_R}\right)^2} \tag{2.14}$$

Oberhalb der Grundresonanz wirkt die Spule wie ein Kondensator, weshalb technische Spulen überwiegend bei Frequenzen weit unterhalb der Grundresonanz eingesetzt werden. Für den induktiven Einsatz bei hohen Frequenzen müssen deshalb Spulen möglichst hohe Resonanzfrequenzen aufweisen. Treibt man die Frequenz über die Grundresonanz hinaus, lassen sich bei realen Spulen noch weitere Resonanzen finden. Oberhalb der zweiten Resonanzfrequenz wirkt die Spule wieder induktiv und so fort.

Verlustfaktor

Bei der idealen verlustfreien Spule läuft die Phase des Stroms der Phase der Spannung um 90° hinterher. Aufgrund der diskutierten Leitungs- und Isolationsverluste ist die Phasenverschiebung bei realen Spulen um den Fehlwinkel δ kleiner. Wie in Abbildung 2.8 für eine reale Spule weit unterhalb der Grundresonanz¹ dargestellt, ergibt sich aus dem Verlustwinkel δ das Verhältnis von Wirkleistung zu Blindleistung [82Z1]:

$$\tan \delta = \frac{|U_w|}{|U_B|} = \left| \frac{I \cdot R}{I \cdot j \cdot \omega \cdot L} \right| = \frac{R}{\omega \cdot L} \quad (2.15)$$

Der Wert $\tan \delta$ wird als Verlustfaktor bezeichnet und liefert ein praktisches Maß für die Verluste der Spule.

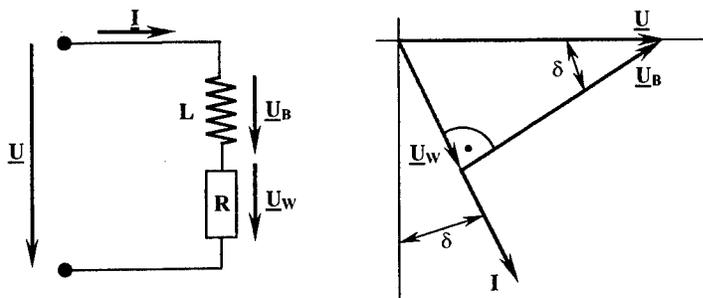


Abb. 2.8: Ersatzschaltbild und Zeigerdiagramm einer Spule mit Verlusten

Gütefaktor

Als Gütefaktor Q einer Spule wird das Verhältnis von Blindleistung zu Wirkleistung definiert. Rechnerisch ergibt er sich aus dem reziproken Wert des Verlustfaktors:

$$Q := \frac{P_{\text{blind}}}{P_{\text{Wirk}}} = \frac{I_{\text{eff}}^2 \cdot \text{Im}(Z)}{I_{\text{eff}}^2 \cdot \text{Re}(Z)} = \frac{\omega \cdot L}{R} = \frac{1}{\tan \delta} \quad (2.16)$$

¹ bei Vernachlässigung der Eigenkapazität

Der Gütefaktor dient zur Beurteilung der Qualität einer Spule und damit zur Beurteilung der Tauglichkeit der Spulenausführung. Induktivität, Wirkwiderstand und Güte ergeben sich aus der komplexwertigen Impedanz, welche wiederum aus dem experimentell bestimmten Reflexionsfaktor¹ der Spule berechnet wird.

2.2 Erzeugung miniaturisierter 3D-Strukturen

Die Erzeugung und Abformung von dreidimensionalen Strukturen und die damit verbundenen vielfältigen Anwendungsmöglichkeiten für die Herstellung miniaturisierter Bauelemente (z.B. Induktivitäten) sind ein zentrales Thema der Mikromechanik. Der Stand der Verfahrenstechnik soll nun umrissen werden.

Technologisch hat sich die Mikromechanik aus der Mikroelektronik entwickelt, weshalb Silizium nach wie vor der dominierende Werkstoff der Mikromechanik ist. Mit Hilfe anisotroper nasschemischer Ätztechniken und künstlich erzeugter Ätzstoppschichten lassen sich dreidimensionale Strukturen aus dem Silizium-Einkristall herausarbeiten. Alle bekannten anisotropen Ätzlösungen für Silizium sind basisch. Die größte Bedeutung hat dabei das Kaliumhydroxid erlangt, dessen Ätzrate senkrecht zur (111)-Kristallebene um etwa zwei Größenordnungen geringer ist als parallel zu dieser. Somit lassen sich Strukturen herausstellen, die von langsam ätzenden (111)-Kristallebenen eingefasst sind. Als Ätzstoppschichten eignen sich Bor-dotierte Siliziumschichten mit einer Dotierstoffkonzentration größer $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$. Die mögliche Formenvielfalt beim anisotropen Siliziumätzen ist aber stark begrenzt, da sich die Strukturen nur durch die (111)-Kristallebenen oder durch eine Ätzstoppschicht einfassen lassen.

Für Induktivitäten ist das halbleitende Silizium als Substratmaterial kaum interessant, da die Wirbelstromverluste im Silizium die Güte der Induktivitäten drastisch verschlechtern. Darüber hinaus ist dieser Werkstoff für Induktivitäten viel zu wertvoll und teuer.

Um bei der Erzeugung von dreidimensionalen Strukturen die Formenvielfalt zu erhöhen und um zudem die Abformung von Mikrostrukturen auch auf andere Werkstoffe wie Kunststoffe, Keramiken und Metalle zu erweitern, wurde Anfang der achtziger Jahre am Kernforschungszentrum Karlsruhe das LIGA-Verfahren entwickelt. Das LIGA-Verfahren ist sehr kostenintensiv, weshalb es für eine Massenproduktion in der Regel ungeeignet ist. Aber aus dem LIGA-Verfahren lassen sich vereinfachte 'Low Cost'-Prozesse für die mikro-systemtechnische Herstellung von 3D-Strukturen ableiten [00M3].

2.2.1 LIGA-Verfahren

Abbildung 2.9 zeigt eine schematische Darstellung des LIGA-Verfahrens. LIGA steht dabei für die wesentlichen Prozessschritte: Röntgentiefenlithographie, Galvanoabformung und Kunststoffabformtechnik. Diese drei Verfahrensschritte bilden den Weg zu einer Serienproduktion von hochpräzisen Mikrokomponenten [93M1].

¹ siehe Unterkapitel 5.1.1, S. 95

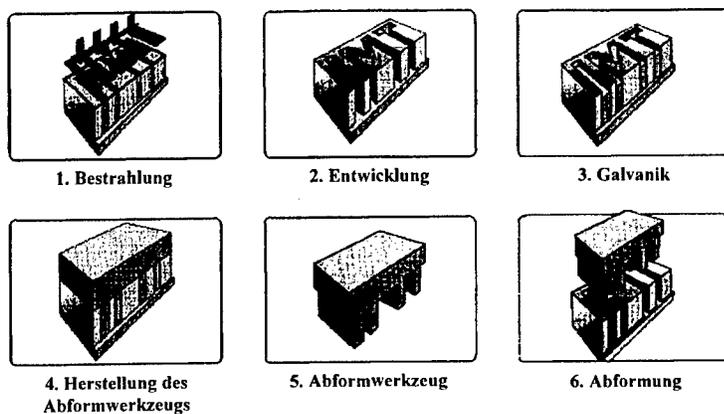


Abb. 2.9: Schematische Darstellung des LIGA-Verfahrens

Röntgentiefenlithographie

Die Röntgentiefenlithographie ermöglicht die Abbildung beliebiger lateraler Strukturen mit dem höchsten Aspektverhältnis [00S1]. Mit Höhen von mehr als einem Millimeter und einem lateralen Auflösungsvermögen von bis zu $0,2 \mu\text{m}$ liegt die Aspektverhältnisgrenze dieses Verfahrens heute bei etwa 500 für Detailstrukturen. Solche anspruchsvollen Strukturen mit extrem glatten und nahezu planparallelen Seitenwänden lassen sich lithographisch nur mit einer intensiven und divergenzfreien (typisch: $0,1$ bis 1 mrad) Röntgenstrahlung, wie sie ein Synchrotron liefert, herstellen. Die verwendete Wellenlänge ist dabei kleiner als $0,25 \text{ nm}$, da der Photolack PMMA (Polymethylmethacrylat bzw. Plexiglas) nur in diesem Bereich ausreichend transparent ist.

Für diese harte Röntgenstrahlung werden spezielle Masken zur Strukturübertragung verwendet. Das transparente Trägermaterial ist eine dünne Titan- oder Berylliumschicht mit Absorberstrukturen aus Gold.

Die durch die Maske fallende Synchrotronstrahlung verändert die Kunststoffschicht, normalerweise PMMA, derart, dass sie mit geeigneten Lösungsmitteln entfernt werden kann und nur die unbestrahlten Bereiche als Primärstruktur zurückbleiben (Positiv-Resist).

Der Entwicklungsvorgang wie auch der nachfolgende Galvanikprozess stellen wegen der hohen Aspektverhältnisse und der sich daraus ergebenden engen und tiefen Kanäle der Struktur große Anforderungen an die Verfahrenstechnik.

Galvanoabformung

Die nach dem Entwickeln vom Kunststoff freigelegten Bereiche lassen sich nun in einem Galvanikprozess mit einem Metall auffüllen. Dadurch entsteht das Negativ der Kunststoffstruktur als metallische Sekundärstruktur aus Metallen wie Nickel [89H1], Kupfer und Gold oder aus Legierungen wie Nickel-Kobalt und Nickel-Eisen. Tabelle 2.3 gibt einen Überblick über die Anwendungsmöglichkeiten der unterschiedlichen Galvanikmetalle.

Metall	Besondere Eigenschaft	Anwendung
Nickel	geeignet für Mikrogalvanik	Formeinsatz für Kunststoffabformung
Gold	guter γ -Absorber	Masken für Röntgenlithographie
Kupfer	gute elektr. Leitfähigkeit	Elektrische Komponenten, Leiterbahnen
Nickel-Kobalt	Härte	Abformwerkzeug
Nickel-Eisen	weichmagnetisch	Mikrostruktur mit besonderen magnet. Eigenschaften

Tab. 2.3: Anwendungsbereiche für unterschiedliche Galvanikmetalle

Nicht mit allen Galvanikbädern kann eine ausreichende Abscheidung in den winzigen Mikrostrukturbereichen erzielt werden. Für die Mikrogalvanik ist eine hohe Ionenbeweglichkeit und ein hoher Stofftransport deshalb von besonderer Bedeutung.

Kunststoffabformtechnik

Die Kunststoffabformtechnik ist beim LIGA-Verfahren der Schlüssel zur Serienfertigung von Mikrostrukturen, wobei die galvanisch abgeschiedene Metallstruktur als Abformwerkzeug dient, um formtreue Replikat der Primärstruktur in großen Mengen zu erzeugen. Für die Abformung kommen prinzipiell die Verfahren Spritzguss, Reaktionsguss (Photomolding) oder Heißprägen in Frage. Die Werkstoffpalette bei der Kunststoffabformung reicht von Thermoplasten mit besonderen optischen Eigenschaften über Werkstoffe mit besonders hoher Chemikalienbeständigkeit bis zu Polymeren mit hoher Temperaturbeständigkeit. Tabelle 2.4 zeigt, welche Kunststoffe im Rahmen des LIGA-Verfahrens für die Abformung von Mikrostrukturen eingesetzt werden.

Verfahren	Kunststoff
Spritzgießen	PMMA, PC, POM, PSU, PE, PA, PEEK, LCP
Heißprägen	PMMA, PC, POM, PSU, PVDF
Photomolding	PMMA

Tab. 2.4: Verfahren und Materialien für die Kunststoffabformung [00R2]

Eigenschaften des LIGA-Verfahrens

Mit dem LIGA-Verfahren ist die Serienfertigung von Mikrostrukturen mit folgenden Eigenschaften möglich:

- Freie laterale Geometrie der Struktur, aber keine Variation bei der Strukturtiefe,
- Strukturhöhe über 1 mm und kleinste laterale Abmessungen bis zu 0,2 μm ,
- Aspektverhältnisse von freistehenden Einzelstrukturen bzw. Detailstrukturen über 50 bzw. 500 (Photolithographie: Maximal 20),
- Oberflächenqualität im Submikrometerbereich mit Rauigkeiten $R_a < 50 \text{ nm}$.

Dabei lässt sich das Verfahren auf sehr unterschiedliche Materialien wie z.B. Polymere, Metalle, Legierungen und auch manche Keramiken (z.B.: Al_2O_3 , ZrO_2) anwenden.

Da das Verfahren keine Variation bei der Strukturtiefe zulässt, ist es für die Herstellung der Spulenkörper und damit der SMT-Substrate ungeeignet. Zudem wird das LIGA-Verfahren durch die Röntgenlithographie zu kostenintensiv für die Massenfertigung von SMT-Induktivitäten, deren Fertigungskosten nicht mehr als etwa 1 Pfennig pro Spule betragen dürfen [01E2]. Es demonstriert aber, dass durch die photolithographische Erzeugung von Mikrostrukturen und deren galvanische Abformung die Herstellung von Metallstrukturen mit sehr hoher Detailgenauigkeit und Reproduzierbarkeit möglich wird. Für ein „Low Cost“-Verfahren, bestehend aus Lithographie und Galvanik, müssen deshalb die kostenintensiven Prozesse unter Einbuße des hohen Aspektverhältnisses und der hohen Detailgenauigkeit durch möglichst kostengünstige Prozesse und Materialien ersetzt werden [95L3], [96L2], [96L3].

Solche Prozesse und Materialien findet man bei der industriellen Massenfertigung von Platinen [67C1]. Auch hier werden die Leiterbahnen aus Kupfer mit Hilfe von Galvanik- und Lithographieprozessen auf den Platinennutzen aufkaschiert. Allerdings liegen die minimalen Strukturgrößen bei $100\ \mu\text{m}$, aber die Techniken sind für die Massenfertigung optimiert.

2.2.2 Semi-Additivtechnik

Es gibt zwei grundverschiedene Wege, Leiterplatten zu fertigen: Bei der Subtraktivtechnik wird die auf den Fertigungsnutzen aufkaschierte Kupferfolie bis auf die Leiterbahnen abgeätzt, wohingegen man beim additiven Verfahren lediglich die Leiterzüge auf die unkaschierte Isolierplatte aufwachsen lässt.

Vorwiegend zur Erzeugung von zweiseitigen Leiterplatten mit Durchkontakten und sehr kleinen Strichbreiten von $200\ \mu\text{m}$ und kleiner werden die beiden Verfahren auf die Weise kombiniert (Abbildung 2.10), dass der Platinennutzen, typischerweise Phenolharz-Hartpapier, glasfaserverstärktes Epoxydharz aber auch andere Werkstoffe wie Polyimid [85S2], zuerst ganzflächig stromlos chemisch verkupfert wird (2). Die Dicke dieser Kupferschicht beträgt nach der galvanischen Verstärkung etwa 1 bis $3\ \mu\text{m}$ (3). Dadurch lassen sich auch die Bohrlöcher der Durchkontakte metallisieren. Anschließend werden die Leiterbahnzwischenräume in einem photolithographischen Prozess abgedeckt (4) und die verbleibenden Leiterbahnen sowie die Bohrungen auf eine Dicke von $35\ \mu\text{m}$ mit Kupfer aufgalvanisiert (5). Nach dem Ablösen des Photoresists (6) erfolgt die Differenzätzung (7), mit der das stromlos chemisch abgeschiedene Kupfer in den Leiterbahnzwischenräumen entfernt wird [80W1]. Diese Technik, welche in Abbildung 2.10 schematisch dargestellt ist, wird als Semi-Additiv-Technik bezeichnet.

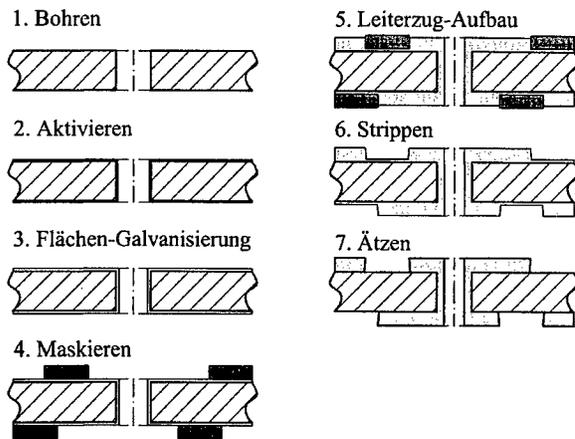


Abb. 2.10: Prozessablauf bei der Semi-Additivtechnik zur Herstellung von durchkontaktierten Leiterplatten

Der Vorteil des Semi-Additiv-Verfahrens liegt in der Differenzätzung [83S2]: Dadurch entfällt der Prozessschritt für das Abscheiden einer metallischen Ätzresistschicht (z.B. Sn, Pb/Sn). Außerdem muss wesentlich weniger Kupfer abgeätzt werden, und die Unterätzung der Leiterzüge ist deutlich geringer als beim Subtraktiv-Verfahren, weshalb dieses Verfahren besonders für kleine Strukturgrößen geeignet ist (Abbildung 2.11).

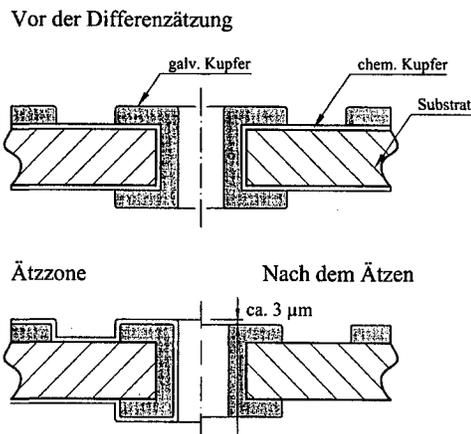


Abb. 2.11: Differenzätzung bei der Semi-Additivtechnik

Kombiniert man die Semi-Additivtechnik mit einer planparallelen und möglichst divergenzfreien Photolithographie und mit den Mikrogalvaniktechniken des LIGA-Verfahrens, so lässt sich daraus ein MST-Verfahren für die Herstellung von metallischen Mikrostrukturen ableiten¹. Dies wird in dieser Arbeit am Beispiel von miniaturisierten SMT-Induktivitäten demonstriert, wobei hier der Übergang von der Planartechnik zu einer dreidimensionalen Geometrie vollzogen wird.

2.2.3 Mikrosystemtechnische Herstellung von SMT-Induktivitäten

Der Schlüssel zur Erzeugung der Windungsstrukturen mit der Semi-Additivtechnik ist die photolithographische Abbildung der Leiterzüge auf den rechteckigen SMT-Spulenkörpern. Dazu müssen vertikale Bauelementflanken im Fertigungsnutzen überall dort vermieden werden, wo mit dem parallelen UV-Licht der Belichtungsmaschine eine Struktur auf den Spulenkörper übertragen werden soll. Dazu werden die quadratischen Spulenkörper um 45° zur Nutzenoberfläche gedreht. Somit erreichen die quasi parallelen Lichtstrahlen in einem doppelseitigen Lithographieprozess alle vier Seitenflächen des Spulenkörpers (Abbildung 2.12) [98D3]. Allerdings tritt hierbei das Problem auf, dass sich die meisten Bereiche der Spulenkörperoberfläche nicht im Kontakt belichten lassen, sondern teilweise einen erheblichen Abstand zur Lithographiemaske aufweisen. Der maximale Proximityabstand tritt an der Spulenkörper-Seitenkante auf und beträgt das $1/\sqrt{2}$ -fache der Breite des Bauelements.

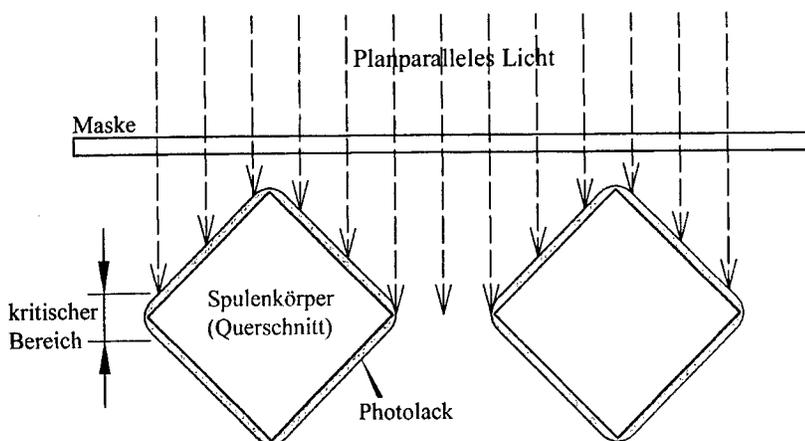


Abb. 2.12: Prinzip der photolithographischen Leiterbahnübertragung auf die SMT-Spulenkörper

¹ In diesem Zusammenhang soll besonders auf die folgenden Arbeiten verwiesen werden: [94B2], [94L1], [95L2], [95M1], [96L4], [96L5]

Um die SMT-Spulen in Semi-Additivtechnik herstellen zu können, müssen deshalb zwei wesentliche Voraussetzungen geschaffen werden:

Einerseits die kostengünstige Massenfertigung geeigneter Substrate, in denen die Spulenkörper entsprechend Abbildung 2.12 mit genügend hoher Positionsgenauigkeit für die Lithographie aufgehängt sind; andererseits die Photolithographie auf den um 45° gekippten Spulenkörperflanken, wozu eine Optik mit einem hohen Tiefenschärfebereich und einer möglichst geringen Divergenz notwendig ist [00W2].

Abbildung 2.13 zeigt schematisch die Prozessabfolge für die Herstellung von miniaturisierten SMT-Induktivitäten mit der Semi-Additivtechnik, wobei auf die entsprechenden Kapitel verwiesen wird [98D2], [00I1]:

Auf den Fertigungsnutzen (1) wird ganzflächig eine etwa 0,5 µm dünne Metallschicht abgeschieden (2), die als Haftvermittler und Startmetallisierung für die elektrochemischen Abscheideprozesse dient. Anschließend wird das Substrat homogen mit einem 20 µm dicken Photolack überzogen und auf diesen in einem doppelseitigen Photolithographieprozess das Negativbild der Leiterbahnen übertragen (3). Zwischen den Photolackstrukturen, die ein nahezu senkrechtes Aufwachsen der Windungsflanken garantieren, werden die Spulenwindungen in einem Kupfergalvanikbad auf eine Dicke von 20 µm aufgebaut (4). Dann werden die Photolackstrukturen gestrippt (5) und die Startmetallisierung in einer Differenzätzung entfernt (6). Da das Schichtdickenverhältnis zwischen der chemischen Kupferschicht (Startmetallisierung) und der galvanischen Kupferschicht 1:40 beträgt, kann das Unterätzen bei der Differenzätzung vernachlässigt werden.

Zum Schluss werden die Leiterbahnen mit einer Schutzpassivierung überzogen (7), die Stirnseiten bzw. Lötflächen verzinnt (8) und die Spulen aus dem Nutzen getrennt (9).

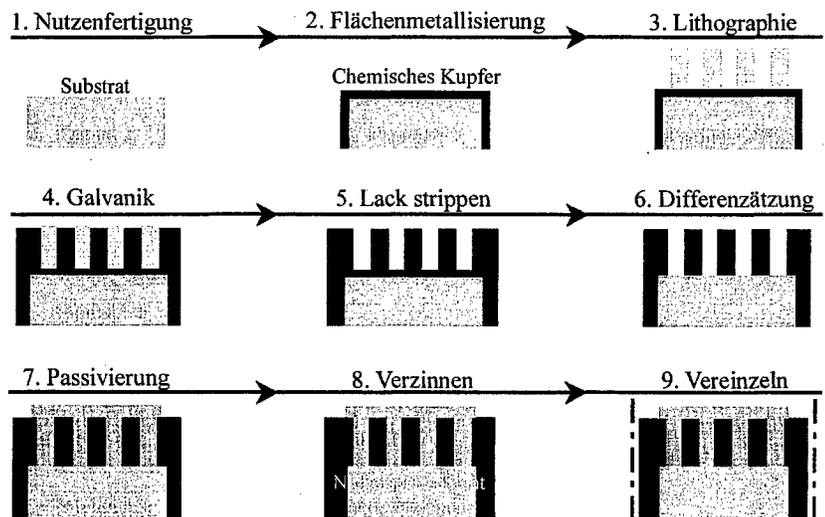


Abb. 2.13: Prozessabfolge der Semi-Additivtechnik zur Herstellung von miniaturisierten SMT-Induktivitäten

3. Nutzenfertigung

SMT-Induktivitäten der Baugröße 0402 werden heute in den Toleranzklassen J ($\pm 5\%$), A ($\pm 3\%$) und G ($\pm 2\%$) gefertigt. Die Fertigungstoleranzen für den Spulenrohling gehen dabei nicht nur in die Abmessungen ein, sondern wirken sich auch nachhaltig auf die Streuung der Induktivität aus, da diese in guter Näherung proportional zu $Querschnitt/Länge = a \cdot b/l$ des Spulenkörpers ist. Legt man die Gaußsche Fehlerfortpflanzung zu Grunde, so gilt für die Induktivitätstoleranz:

$$\left(\frac{\Delta L}{L}\right)^2 = \left(\frac{\Delta a}{a}\right)^2 + \left(\frac{\Delta b}{b}\right)^2 + \left(\frac{\Delta l}{l}\right)^2 \quad (3.1)$$

In Wirklichkeit geht allerdings nur die aufgewickelte Drahtlänge und die Windungsdichte, damit aber lediglich indirekt die Spulenkörperlänge l in die Induktivität ein. Bei dem hier vorgestellten photolithographischen Verfahren zur Erzeugung der Spulenwindungen wirkt sich eine Abweichung der Spulenkörperlänge vom Idealwert nur auf die Breite der metallischen Lötflächen aus, nicht aber auf den Windungsbereich, weshalb man in guter Näherung den letzten Term in Gleichung (3.1) vernachlässigen kann. Somit kann die Induktivitätsschwankung, verursacht durch die Fertigungstoleranzen Δx für den Spulenrohling, folgendermaßen abgeschätzt werden¹:

$$\left|\frac{\Delta L}{L}\right| \approx \sqrt{2} \cdot \left|\frac{\Delta x}{x}\right| \quad (3.2)$$

Die nachfolgende Tabelle zeigt, in welchen Toleranzgrenzen die Spulenkörperbreite der Bauform 0402 nach dieser Abschätzung gefertigt werden muss, wenn man die entsprechende Toleranzklasse für die Induktivität anstrebt.

Toleranzklasse	$ \Delta L/L $	$ \Delta x/x $	$x \pm \Delta x$ in μm
J	5,0 %	3,5 %	400 ± 14
A	3,0 %	2,1 %	400 ± 9
G	2,0 %	1,4 %	400 ± 6

Tab. 3.1: Toleranzklassen für die Spulenkörperbreite (Bauform 0402)

Aus diesem Grund werden an die Herstellung der Substrate hohe Anforderungen gestellt, die bereits bei der Materialauswahl und dem Substratdesign entsprechend berücksichtigt werden müssen.

Darüber hinaus beeinflussen Substratmaterial, Design und Nutzenfertigung entscheidend die Fertigungskosten für SMD-Induktivitäten. Angestrebt wird hierbei ein Wert von weniger als ein Pfennig pro Spulenkörper [01E2].

¹ Quadratischer Spulenkörperquerschnitt bedeutet $a = b$

3.1 Anforderungen an das Substratmaterial

Das Substratmaterial muss sowohl für die Bauelementfertigung wie auch für die Bauelementanwendung eine Reihe von Anforderungen erfüllen, damit das hier entwickelte Herstellungsverfahren angewendet werden kann und damit die Toleranzklassen J, A und G mit genügend hoher Ausbeute gefertigt werden können:

1. **Kurzzeitige Gebrauchstemperatur:** Herkömmliche Lötbadern mit bleihaltiger Lotpaste erfordern eine Temperaturbeständigkeit der SMT-Bauteile von 260 °C für 10 sec. Mit der Einführung von bleifreien Lotpasten verschiebt sich diese Anforderung aufgrund der erhöhten Schmelzbereiche um ca. 40 °C, weshalb für das Substratmaterial eine **Temperaturbeständigkeit von 300 °C für 10 sec** ohne irreversible Volumenänderungen gewährleistet werden muss.
2. **Dauergebrauchstemperatur:** SMT-Bauelemente werden mindestens für den Umgebungstemperaturbereich -55 °C bis +125 °C qualifiziert, um den Anforderungen der KFZ-Industrie gerecht zu werden. Berücksichtigt man die Eigenerwärmung des Bauelements, so muss für die Spulenkörper eine **Dauergebrauchstemperatur von 150 °C** garantiert werden. Die Volumenänderungen im Temperaturbereich von -55 °C bis 150 °C müssen so gering sein, dass sich die elektrischen Eigenschaften des Bauelements nur im Rahmen der Fehlertoleranzklasse ändern, weshalb der **Längenausdehnungskoeffizient kleiner als $10^{-4} 1/K$** sein muss [98E1].
3. **Chemische Resistenz:** Das Substratmaterial muss genügend resistent gegenüber den einzelnen Prozessschritten des Fertigungsverfahrens sein, insbesondere resistent gegen
 - Lösungsmittel, die zur Substratreinigung eingesetzt werden,
 - stark saure elektrochemische Bäder (pH-Wert < 1),
 - stark alkalische Entwicklermedien für die Photolithographieprozesse.
4. **Wasseraufnahme:** Das Substratmaterial darf während der nasschemischen Prozesse kein Wasser aufnehmen, da das Aufquellen zu nicht reproduzierbaren Volumenänderungen und damit zu Induktivitätsschwankungen führt.
5. **Metallisierung:** Für die Erzeugung der Leiterbahnen wird ganzflächig eine Startmetallschicht auf dem Substrat abgeschieden. Damit die Leiterbahnen nicht abplatzen, sollte sich das Substrat mit einer Haftfestigkeit von mindestens 0,6 N/mm² [00M4] metallisieren lassen. Bevorzugt werden Substratmaterialien, die sich mit ausreichender Haftung stromlos verkupfern lassen.
6. **Elektrische Eigenschaften:** Um parasitäre Strompfade und Wirbelstromverluste zu minimieren, muss der Spulenkörper eine möglichst geringe Leitfähigkeit ($< 10^{-12} \Omega^{-1} cm^{-1}$) aufweisen. Die Hochfrequenzanwendungen, für welche diese Baugröße gedacht ist, erfordern eine niedrige elektrische Permittivität möglichst nahe an 1, damit parasitäre Kapazitäten minimiert und eine möglichst hohe Resonanzfre-

¹ Toleranzklasse G: $\frac{\Delta x}{x} = \alpha \cdot 150^\circ C \leq 1,4 \% \Leftrightarrow \alpha \leq 9 \cdot 10^{-5} \frac{1}{K}$

quenz erreicht werden kann. Ebenso müssen magnetische Hystereseverluste so gering wie möglich gehalten werden, weshalb auch die magnetische Permeabilität möglichst nahe an der 1 liegen soll.

7. **Mechanische Eigenschaften:** Das Substrat muss ausreichend steif sein, damit bei den mechanischen Belastungen der nachfolgenden Prozessschritte, insbesondere bei den Photolithographieschritten und der Bauelementvereinzelung, die Positionsgenauigkeit zwischen den Spulenkörpern und den Justiermarken gewährleistet werden kann.
8. **Massenproduktion:** Das Substratmaterial muss für die kostengünstige Massenabformung der Substrate geeignet sein. In der Massenfertigung soll ein Substrat, das mindestens tausend Spulenkörper integriert, bei einer Stückzahl von einer Million Substrate pro Jahr nicht mehr als zehn DM kosten [01E2].

Diese Anforderungen reduzieren die Materialauswahl auf keramische Werkstoffe und einige wenige hochtemperaturbeständige Kunststoffe. Die Einsatzmöglichkeit dieser beiden Werkstoffklassen wird im folgenden diskutiert.

3.2 Technische Keramiken

Keramische Werkstoffe sind anorganische nichtmetallische Verbindungen, die bei Raumtemperatur aus der pulverförmigen Rohmasse geformt werden und ihre typischen Werkstoffeigenschaften durch einen Sintervorgang bei Temperaturen von 1000 °C bis über 2000 °C erhalten. Beim Sintervorgang wachsen die Pulverkörner zu einem festen kristallinen Gefüge zusammen. Unvermeidlich ist beim Sintern aufgrund der hohen Verdichtung des Materials ein Volumenschwund von bis zu 30 %, der als Sinterschwund bezeichnet wird.

Keramische Werkstoffe zeichnen sich durch hohe Festigkeit, Härte und Verschleißfestigkeit aus. Des Weiteren sind sie in der Regel thermisch und elektrisch gut isolierend und weisen eine hohe Temperaturbeständigkeit auf. Auch die günstigen chemischen Eigenschaften wie Korrosionsbeständigkeit machen Keramiken als technischen Werkstoff interessant. Demgegenüber schränkt die große Sprödigkeit der Keramiken und damit verbunden die geringe Belastbarkeit durch Temperaturschwankungen die Einsatzmöglichkeiten ein. Tabelle 3.2 zeigt die keramischen Eigenschaften im Überblick:

Eigenschaften keramischer Werkstoffe			
Mechanisch	Elektrisch	Thermisch	Chemisch
Verschleißfestigkeit	Isolierfähigkeit	Hochtemperaturfestigkeit	Korrosionsbeständigkeit
Festigkeit	Durchschlagsfestigkeit	Temperaturwechselbeständigkeit	Katalytische Eigenschaften
Härte	Dielektrische Eigenschaften	Wärmeisolation / Wärmeleitfähigkeit	Bio-chemische Eigenschaften
Dichte	Piezoelektrische Eigenschaften	Wärmedehnung	
		Wärmeformbeständigkeit	

Tab. 3.2.: Keramische Eigenschaften im Überblick

Die keramischen Werkstoffe lassen sich nach ihrer chemischen Zusammensetzung in Silicatkeramik, Oxidkeramik und Nichtoxidkeramik unterteilen (Tabelle 3.3). Für elektrotechnische Anwendungen sind die ersten beiden Gruppen von größter Bedeutung.

Silicatkeramik	Oxidkeramik		Nichtoxidkeramik			
	einfache Oxide	mehrkomponentige Oxide	Carbide	Nitride	Boride	Silicide
z.B. Tongut Tonzeug						
Mullit ($3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$)	Al_2O_3	Ferrite ($\text{MeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, $\text{MeFe}_{12}\text{O}_{19}$)	SiC	Si_3N_4	TiB_2	MoSi_2
Sillimanit ($\text{Al}[\text{AlSiO}_5]$)	ZrO_2	Titanate (BaTiO_3 , Al_2TiO_5)	B_4C	BN	ZrB_2	WSi_2
Montmorillonite $\text{Al}_2(\text{OH})_2[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$	MgO	PLZT-Keramik	WC	AlN	LaB_6	
Cordierit ($\text{Mg}_2\text{Al}_3[\text{AlSi}_5\text{O}_{18}]$)	BeO	keram. Supraleiter	TiC	TiN		
Steatit ($\text{Mg}_3[(\text{OH})_2/\text{Si}_4\text{O}_{10}]$)	TiO_2		TaC	ZrN		
Forsterit ($\text{Mg}_2[\text{SiO}_4]$)	ThO_2		NbC	(Sialon)		
Glaskeramik	UO_2		(Graphit)			

Tab. 3.3: Wichtige technische Keramiken und deren Einteilung nach chemischer Zusammensetzung

In der Elektrotechnik werden Keramiken wegen ihrer hohen Isolierfähigkeit und Durchschlagsfestigkeit bevorzugt als mechanisch belastbare Isolatoren eingesetzt. Die wichtigsten elektrotechnischen Werkstoffe sind das Porzellan (C 100), der Steatit (C 200), der Cordierit (C 400/500), das Aluminiumoxid (C 700) und das Aluminiumnitrid (C 900).

Die elektrischen und mechanischen Eigenschaften lassen Keramiken als gut geeigneten Werkstoff für Spulenkörper erscheinen, weshalb bis heute nahezu alle SMT-InduktivitätsbaufORMen zwei KeramiktYPen als Basismaterial benutzen. Es handelt sich zum Einen um die einfache Oxidkeramik Al_2O_3 zum Anderen um den Sonder- bzw. Hochfrequenzsteatit. Die wichtigsten Eigenschaften dieser Keramiken werden im folgenden kurz zusammengefasst.

Aluminiumoxid

Beim Aluminiumoxid in Form von Sinterkorund ($\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$) mit einem Al_2O_3 -Gehalt zwischen etwa 80 % und mehr als 99 % handelt es sich um den wichtigsten oxidkeramischen Werkstoff. Er wird in Abhängigkeit vom Al_2O_3 -Gehalt in die vier Gruppen C 780, C 786, C 795 und C 799 unterteilt, wobei die letzten beiden Ziffern den minimalen Al_2O_3 -Gehalt angeben. Verunreinigungen treten in Form von Siliziumoxid und Metalloxiden wie MgO, Fe_2O_3 und Na_2O auf. Die Sintertemperatur liegt je nach Korngröße und Reinheitsgrad zwischen 1350 °C und 1650 °C und damit deutlich unter der Schmelztemperatur von 2050 °C. Als Sinterhilfsmittel wird in der Regel 0,1 % bis 0,5 % MgO zugesetzt, wodurch diskontinuierliches Kornwachstum verhindert und eine höhere Festigkeit erreicht wird. Sintert man zusätzlich im Vakuum oder unter Wasserstoffatmosphäre, so erhält man durch das Verschwinden aller Poren aus der hochreinen Rohmasse einen transparenten Werkstoff nahe

an der theoretischen Dichte. Der Sinterschwund liegt für Aluminiumoxid in der Größenordnung von 20 %.

Durch seine vielseitigen Eigenschaften, seine besonders hohe Festigkeit und Härte (Härte 9 nach der Mohsschen Skala [82S1]) bei einem gleichzeitig guten Preis-Leistungsverhältnis findet das Aluminiumoxid in nahezu allen Bereichen Anwendung. Es wird auch bevorzugt verwendet für die Herstellung von Substraten, weshalb es für die Abformung der SMT-Substrate in Betracht gezogen wurde. Tabelle 3.4 gibt einen Überblick über die elektrischen und thermischen Eigenschaften dieses Werkstoffs.

Steatit

Steatit ist ein silikatischer Werkstoff auf der Basis von Speckstein mit einer typischen Zusammensetzung von 58 bis 65 % SiO₂, 26 bis 32 % MgO, 3 bis 6 % Al₂O₃ und 1,3 % Na₂O bei Normalsteatit C 220 bzw. 7 % BaO bei Barium- oder Sondersteatit C 221 [83S1]. Der Sondersteatit wurde speziell als Isolierstoff für die Hochfrequenztechnik entwickelt und zeichnet sich durch einen geringen Verlustfaktor sowie durch eine niedrige Permittivität aus (Tabelle 3.4). Der Werkstoff ist durch die besonderen Fertigungseigenschaften maßgenau und formstabil, wobei als typische Formgebungsverfahren das Trockenpressen, Extrudieren und Gießen Verwendung finden. Die Sintertemperatur liegt zwischen 1300 °C und 1400 °C.

Bez. nach IEC 672	Bemerkung	$\tan\delta$ (48-62) Hz	ϵ (48-62) Hz	E_d^1 [kV/mm]	ρ [Ω m]	$\Delta l/l$ [$10^{-6}K^{-1}$]
C 780	(80-86)% Al ₂ O ₃	$1 \cdot 10^{-3}$	8	10	10^{12}	6-8
C 786	(86-95)% Al ₂ O ₃	$0,5 \cdot 10^{-3}$	9	15	10^{12}	6-8
C 795	(95-99)% Al ₂ O ₃	$0,5 \cdot 10^{-3}$	9	15	10^{12}	6-8
C 799	> 99% Al ₂ O ₃	$0,2 \cdot 10^{-3}$	9	17	10^{12}	7-8
C 220	Steatit	$5 \cdot 10^{-3}$	6	15	10^{11}	7-9
C 221	HF-Steatit	$1,5 \cdot 10^{-3}$	6	20	10^{11}	7-9

Tab. 3.4: Elektrische und thermische Eigenschaften von technischen Al₂O₃ und Steatit [9711]

Bei der Abformung von Keramiken erweist es sich als schwierig, sehr geringe Abmessungstoleranzen einzuhalten. Dies liegt darin begründet, dass sich von der Formgebung bis zum endgültigen Sintern des Grünkörpers zum Weißkörper das Volumen durch das Ausheizen von Dispersions- und Bindemitteln beim Trocknen sowie durch die Verdichtung des Materials beim Sintern um bis zu 30 % verringert. Da der Sinterschwund relativ reproduzierbar ist, lassen sich durch Berücksichtigung des Schwunds bei der Werkzeuggestaltung Fertigungstoleranzen von maximal ± 5 % erzielen. Auf diese Weise verlassen heute über 80 % der gefertigten Keramikkomponenten die Produktion einbaufertig ohne Nachbearbeitung. Für die Abformung der SMT-Substrate, für die eine Fertigungstoleranz von höchstens $\pm 3,5$ % (Tabelle 3.1) bei sehr kleinen Abmessungen angestrebt wird, ist dies bereits zu ungenau. Die Fertigungstoleranzen lassen sich zwar durch eine Nachbearbeitung der Substrate nach dem Sintern nochmals verbessern, aber dieser Prozessschritt ist für die Herstellung der SMT-Substrate zu kostenintensiv. Deshalb hat man sich hier für die Abformung der Substrate aus einem hochtemperaturbeständigen Kunststoff entschieden, da

¹ Durchschlagsfestigkeit

der Materialschwund bei der Spritzgussabformung von Kunststoffen um ein Vielfaches geringer und damit berechenbarer ist.

Abbildung 3.1 zeigt einen Vergleich der elektrischen Eigenschaften von technischen Keramiken mit Kunststoff. Dieser zeigt, dass Kunststoffe, abgesehen von der Temperaturbeständigkeit, noch günstigere Eigenschaften für diese SMT-Anwendung mit sich bringen.

Minimum → Maximum	Silikat-keramik C 100/200		Silikat-keramik C 400/500		Aluminium-oxid 50-99 % Al ₂ O ₃ C 600/700		Aluminium-nitrid AlN		Kunststoff	Optimal für SMT
	utW	otW	utW	otW	utW	otW	utW	otW		
Spezifischer Widerstand bei 20 °C										
Spezifischer Widerstand bei 600 °C									*	
Dielektrische Konstante bei 48 - 62 HZ										
Dielektrischer Verlustfaktor bei 20 °C, 48 - 62 HZ										
Durchschlagfestigkeit										

Abb. 3.1: Elektrische Eigenschaften technischer Keramiken im Vergleich zu Kunststoff.
 utW = unterer typischer Wert otW = oberer typischer Wert
 * = Angabe für Kunststoff i.a. nicht möglich

3.3 Hochtemperaturbeständige Kunststoffe

Aufgrund der Anforderungen an die Temperaturbeständigkeit kommen nur Hochtemperaturkunststoffe mit ausreichender Schlagzähigkeit und Festigkeit als Substratmaterial in Frage. Grundsätzlich werden Kunststoffe als solche klassifiziert, wenn sie Dauergebrauchstemperaturen von über 150 °C standhalten.

3.3.1 Beurteilung der Wärmeformbeständigkeit

Der Schmelzpunkt T_m bzw. Schmelzbereich eines Polymers kann in der Regel nicht als Maß für dessen Dauergebrauchstemperatur bzw. Wärmeformbeständigkeit herangezogen werden. Er liefert lediglich eine untere Grenze für die thermoplastische Verarbeitungstem-

peratur, weshalb andere Kriterien zur Beurteilung der Wärmebelastbarkeit von Polymeren herangezogen werden müssen.

Weitaus nützlichere Ergebnisse für die Wärmeformbeständigkeit erzielt man mit der Glastemperatur T_G [77B1]. Hier findet ein Phasenübergang von einem glasartigen Zustand, in dem der Kunststoff mechanisch belastbar ist, in den Zustand einer frei fließenden Flüssigkeit statt. Dabei erfährt die funktionale Abhängigkeit einer thermodynamischen Größe wie Volumen, Dichte, Wärmekapazität etc. von der Temperatur eine sprunghafte Änderung. In der Regel findet bei einem Kunststoff der Übergang zwischen dem Zustand des Glases und der frei fließenden Flüssigkeit nicht schlagartig statt, sondern es existiert in einem Übergangsbereich ein stabiler Zwischenzustand, der auch als Kautschukplateau bezeichnet wird. In diesem Zwischenzustand ist der Kunststoff zwar mechanisch nicht mehr belastbar, aber er liegt auch noch nicht in der Schmelze vor, und daher ist der Schmelzpunkt nicht zur Beurteilung der Wärmeformbeständigkeit geeignet. Der Übergang vom glasartigen zum flüssigen Zustand ist von Polymer zu Polymer sehr unterschiedlich, weshalb ein exakter, direkter Vergleich der Wärmeformbeständigkeit zwischen zwei verschiedenen Kunststoffen schwierig ist [78E1].

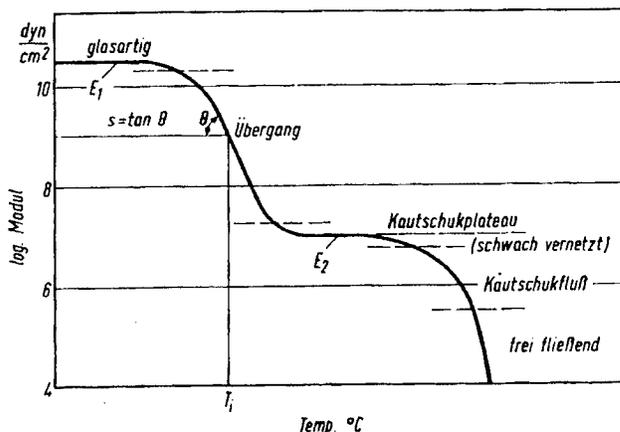


Abb. 3.2: Torsionsmodul am Phasenübergang eines teilkristallinen Polymers [69B1]

Die Bestimmung der Glastemperatur ist sehr aufwändig, weshalb sich für die Praxis drei definierte Prüfverfahren zur Bestimmung der Wärmeformbeständigkeit etabliert haben [86H1], [72L1]: Martens (DIN 53 458), Vicat (DIN 53 460) und ISO/R75 (DIN 53 461). Am gebräuchlichsten ist die Angabe der Formbeständigkeit nach ISO/R75, auch bezeichnet als Heat Deflection Temperature (kurz: HDT). Hierbei wird der Probekörper im Flüssigkeitsbad (meist Silikonöl) bei konstanter Biegebeanspruchung so lange erwärmt, bis die Durchbiegung in etwa $0,3 \text{ mm}^1$ beträgt. Abbildung 3.3 zeigt das Prüfverfahren schematisch.

¹ Variiert in Abhängigkeit von der Höhe des Probekörpers zwischen $0,21 \text{ mm}$ und $0,33 \text{ mm}$.

Probekörper	in mm	Prüfverfahren	Biegespannung [N/mm ²]
Länge	≥ 110	HDT/A	1,8
Breite	3,0 - 4,2	HDT/B	0,45
Höhe	9,8 - 15,0	HDT/C	5

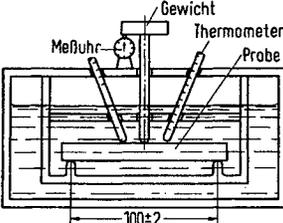


Abb. 3.3: Wärmeformbeständigkeitsprüfung nach ISO/R75 bzw. HDT [97D2]

3.3.2 Überblick über temperaturbeständige Kunststoffe

Die Temperaturbeständigkeit von Polymeren lässt sich sowohl durch die Synthese wie auch durch die Verarbeitung verbessern. Die wichtigsten erfolgversprechenden Wege zur Erhöhung der Wärmeformbeständigkeit bei der Synthese von thermoplastischen Werkstoffen sollen hier kurz angesprochen werden [95B1], [79S1].

1) Aliphatische Polyfluorkohlenwasserstoffe

In aliphatischen und aromatischen C-H-Verbindungen kann der leicht oxydierbare Wasserstoff teilweise oder ganz durch Fluor ersetzt werden. Wegen der stärkeren Atombindung, des geringeren Atomabstands und des größeren Atomradius der Fluoratomen werden die C-Atome wesentlich stärker abgeschirmt und das Molekül insgesamt gestreckt. Dadurch wird ein engeres Zusammenlagern mit stärkeren intermolekularen Bindungskräften möglich. Insgesamt lässt sich so die Kristallinität und damit die Glas temperatur erhöhen [83E1].

2) Aromatische Polymere mit Kohlenstoff-Isoketten

Die Dauertemperaturbeständigkeit lässt sich auch erhöhen, indem man die C-H-Isoketten im Strukturelement durch vergleichsweise starre aromatische Ringsysteme (Benzolringe) ersetzt, was insgesamt zu einer starken Versteifung der Makromolekülketten führt.

3) Polymere mit Heteroketten und Heterocyclen

Mit die höchste Temperaturbeständigkeit lässt sich durch die Verknüpfung aromatischer Ringsysteme (Benzolringe) mit stark polar wirkenden Atomen bzw. Atomgruppen wie z.B. O, S, SO₂, CO oder NH-CO erreichen. Durch die erhöhte Polarität werden die intermolekularen Bindungen verstärkt, wodurch die Glas temperatur heraufgesetzt wird. In diese Werkstoffgruppe fallen Kunststoffe wie das Polyimid (PI), das aromatische Polyamid (PA), das Polyphenylensulfid (PPS) und das Polyetheretherketon (PEEK).

4) Leiterpolymere

Neben der Substitution von Atomgruppen kann die Formbeständigkeit auch durch strukturelle Veränderungen im Monomer verbessert werden. Ein Beispiel hierfür ist die Cyclisierung von verzweigten C-H-Ketten im Monomer, wobei der Nebenast der Kette mit dem Hauptast zu einem Ring kondensiert. Dadurch entsteht eine Makromolekülkette aus Ringen ohne frei drehbare Bindungen, die sich deshalb durch eine extreme Steifheit auszeichnet. Die Struktur erinnert an eine Sprossenleiter, weshalb solche Polymere auch Leiterpolymere genannt werden.

Tabelle 3.5 zeigt eine Einteilung von handelsüblichen, temperaturbeständigen Kunststoffen nach den erwähnten Syntheseverfahren.

Hochtemperaturbeständige Kunststoffe			
<i>Aliphatische Polyfluor- orkohlenwasserstoffe</i>	<i>Aromatische Polymere mit Kohlenstoff- Isoketten</i>	<i>Polymere mit Hetero- ketten und Hetero- cyclen</i>	<i>Leiterpolymere</i>
PTFE / FEP (Teflon®) Fluorelastomer (Viton®) PCTFE, PVF, PVFD	Poly-p-phenylen (PPP) Poly-p-xylylen (PPX)	PPS (Ryton®) PEEK (Ketron®) PPO, PSU, PES Polyamid (Kevlar®) Polyimid (Cyrlex®) PAI, PEI, PESI, PBI, PPQ	Cyclisiertes Polybutadien (Pluton®) PAN (Black Orlon®)

Tab. 3.5: Klassifizierung von hochtemperaturbeständigen Kunststoffen

5) Flüssigkristalline Polymere

Die flüssigkristallinen Polymere (kurz: LCP¹), welche den Leiterpolymeren sehr ähnlich sind, zeichnen sich ebenfalls durch hohe Dauergebrauchstemperaturen aus. Starre, stark form-anisotrope Monomere ermöglichen den flüssig-kristallinen Zustand. In der Schmelze bleibt durch die Anisotropie dieser Moleküle eine Orientierungs-Fernordnung im Polymerwerkstoff bestehen, was dann als flüssig-kristalliner Zustand oder Mesophase bezeichnet wird. Für die stäbchen- oder scheibenförmigen Molekülgruppen wird auch der Begriff mesogene Einheit verwendet. Die hohen Gebrauchstemperaturen lassen sich durch die geringe Entropiezunahme beim Übergang von der kristallinen in die geschmolzene Phase verstehen [88B1].

Thermoplaste und Duroplaste

Bei den bisherigen Betrachtungen wurde nur der Aufbau der einzelnen Makromoleküle des Polymers berücksichtigt und stillschweigend zugrunde gelegt, dass die einzelnen Makromoleküle nicht oder nur geringfügig miteinander vernetzt sind. Solche Kunststoffe werden als Thermoplaste bezeichnet. Sie lassen sich reversibel vom festen, harten Zustand in die Schmelze überführen und deshalb durch Pressen, Extrudieren oder Spritzgießen verarbeiten.

Im Gegensatz dazu weisen die Duroplaste engmaschig vernetzte Makromoleküle auf, weshalb sie sich durch Temperaturerhöhung nicht schmelzen und plastisch verformen lassen, sondern ihre starre Form und ihre mechanischen Eigenschaften bis nahe zur Zersetzungstemperatur beibehalten. Im Vergleich zu den Thermoplasten sind die Duroplaste steifer und härter, weisen bei Langzeitbeanspruchung eine geringere Tendenz zur Verformung auf und können in der Daueranwendung höheren Temperaturen ausgesetzt werden. Duroplastische Werkstoffe werden häufig aus thermoplastischen Vorstufen hergestellt, welche während oder nach der Formgebung durch chemische Reaktionen und teilweise unter

¹ Liquid Crystal Polymer

zusätzlicher Wärmezufuhr vernetzt werden. Dieser Härtingsprozess verlängert allerdings die Zykluszeit bei der Herstellung von Formteilen drastisch, was sich dann sehr stark auf die Stückkosten bei der Massenfertigung auswirkt.

Von den Materialeigenschaften sind die Duroplaste den Keramiken ähnlicher als die Thermoplaste und deshalb für die Herstellung der SMT-Substrate prinzipiell besser geeignet.

Verstärkende Füllstoffe

Bei der Verarbeitung von Kunststoffen lässt sich die Wärmeformbeständigkeit, die Temperaturabhängigkeit der mechanischen Werte und der Schwund durch den Einbau von hochtemperaturbeständigen, verstärkenden Füllstoffen wesentlich verbessern [83G1]. Insbesondere anorganische Materialien wie Glasfaser, Kohlefaser, Graphit, Quarz und Asbest finden hierbei Verwendung. Nachteilig wirken sich die zum Teil sehr harten Verstärkerstoffe auf den Verschleiß der Abformwerkzeuge aus. Tabelle 3.6 zeigt, wie sich die Wärmeformbeständigkeit von Polyimid (PI) und Polyetheretherketon (PEEK) durch Beimengen von Verstärkern erhöhen lässt.

DIN - Bez.	Verstärker und Zusätze	T_D [°C]	T_G [°C]	T_W [°C]	T_K [°C]
PI	Keine Zusätze	230 - 300	250	238	300
PI CS 15	15 % Graphit (CS)	300	360 - 375	> 370	350
PI GF 30	30% Glasfaser (GF)	240 - 300	250	245	300
PI CF 30	30% Kohlefaser (CF)	240 - 300	250	245	300
PI	Kohlefasern, PTFE, Graphit	240 - 300	250	238	330
PEEK	Keine Zusätze	260	143	140	300
PEEK GF 30	30% Glasfaser (GF)	260	143	315	300
PEEK CF 30	30% Kohlefaser (CF)	260	143	315	300
PEEK	10% CF, PTFE, Graphit	260	143	277	300

Tab. 3.6: Verbesserung der Temperaturbeständigkeit von PI und PEEK durch Verstärker:
 T_D : Dauergebrauchstemperatur T_G : Glasstemperatur
 T_W : Formbeständigkeit nach HDT/A T_K : Kurzzeitige Gebrauchstemperatur

Aufgrund der Anforderungen an die mechanische Belastbarkeit und auch hinsichtlich des Preises muss der Kunststoff für die SMT-Substrate mit Verstärkungsstoffen gefüllt werden. Die Verstärkungsstoffe dürfen allerdings die Oberflächenrauigkeit nicht in dem Maße verschlechtern, dass sich 10 µm-Strukturen nicht mehr gegen die Korngröße des Füllstoffs an der Oberfläche abheben. Glasfaser mit einer typischen Faserbreite von 20 µm ist aus diesem Grund nicht geeignet. Bevorzugt wird deshalb ein Mineralfüllstoff in Form von Whiskern.

3.3.3 Technische Kunststoffe für SMT-Substrate

Für die kostengünstige Fertigung der SMT-Substrate kommen nur handelsübliche Massenprodukte in Frage. Im Folgenden werden vier Werkstofftypen zur Diskussion gestellt. Da sich die Materialdaten der verschiedenen Hersteller unterscheiden, wird gegebenenfalls auf ein spezielles Handelsprodukt Bezug genommen.

Polyphenylensulfid (PPS)

PPS, ein halbkristalliner Hochleistungsthermoplast, ist nur in verstärkter Form handelsüblich, da er unverstärkt bei relativ geringen Temperaturen von einem glasartigen in einen gummiähnlichen Zustand übergeht, also ein relativ breites Kautschukplateau aufweist. Wenn die verstärkten Varianten nach dem Formen gehärtet werden, zeichnen sie sich jedoch durch höhere Kristallinität und gute Wärmebeständigkeit aus. So wird für Fortron (Handelsname der Fa. Ticona für die PPS-Produkte) eine Schmelztemperatur von 280 °C und eine Wärmeformbeständigkeit von 270 °C nach HDT/A angegeben (Typ FORTRON 6850L6) [00T1].

Zudem verfügt PPS über Eigenschaften wie niedrige Viskosität in der Schmelze, gute elektrische Eigenschaften, geringe Kriechneigung bei hohen Temperaturen, gute Chemikalienbeständigkeit, inhärente Flammwidrigkeit, hohe Härte und Steifheit. Allerdings ist PPS trotz der guten Formbeständigkeit ziemlich kerbempfindlich.

Für die Spritzgussverarbeitung empfiehlt die Fa. Ticona eine Massetemperatur von 320 °C bis 340 °C und eine Werkzeugwandtemperatur von mindestens 140 °C bei einer mittleren Einspritzgeschwindigkeit. PPS ist etwas billiger als die meisten Hochleistungsthermoplasten und lässt sich sehr gut im Spritzguss verarbeiten. Deshalb ist PPS prinzipiell für eine kostengünstige Massenproduktion geeignet. Allerdings lässt sich PPS nicht stromlos chemisch metallisieren (siehe Unterkapitel 3.1, Anforderung Nr. 5, S. 25).

PPS wird für das Umhüllen von SMT-Komponenten im Spritzguss eingesetzt und ist aufgrund seiner Formbeständigkeit für Lötbadtemperaturen von 260 °C, nicht aber für die geforderten 300 °C, geeignet.

Polyetheretherketon (PEEK)

PEEK ist ein halbkristalliner Hochleistungsthermoplast mit den typischen Eigenschaften der Polyetherketongruppe: Festigkeit, Steifheit, Härte und eine hohe Wärmebeständigkeit, die den geforderten Ansprüchen für SMT-Substrate genügt. Für das PEEK der Fa. Victrex wird eine Dauertemperaturbeständigkeit von 260 °C und eine Wärmeformbeständigkeit von 315 °C nach HDT/A (Typ: 450 GL 30) angegeben.

Weitere Eigenschaften sind die gute Beständigkeit gegenüber chemischen Substanzen und inhärent geringe Entflammbarkeit sowie geringe Rauchentwicklung beim Verbrennen. PEEK weist eine gute Verschleißfestigkeit, eine gute Beständigkeit in Bezug auf dynamische Belastungen und Strahlung auf und kann im Spritzguss verarbeitet werden. Da die Werkzeugtemperatur bei der Verarbeitung ca. 400 °C beträgt, ist die Werkzeugherstellung und Spritzgussverarbeitung sehr aufwändig und kann nicht von jeder Spritzgießerei durchgeführt werden. Der Materialpreis für 1 kg PEEK liegt zwischen 150 DM und 200 DM, womit PEEK zu den teuersten technischen Kunststoffen gehört.

Anwendungsbereiche für PEEK sind hauptsächlich hochbeanspruchte Präzisionsteile in der Luft- und Raumfahrt und in der Medizintechnik sowie in strahlungsreichen Umgebungen eingesetzte Teile.

Von den Eigenschaften ist PEEK als Material für SMT-Substrate sehr gut geeignet, allerdings scheidet es aufgrund der schwierigen Verarbeitung für ein so komplexes Formteil aus.

Flüssigkristalline Polymere (LCP)

Charakteristisches Merkmal dieser Thermoplaste ist der molekulare Aufbau aus starren, stabförmigen Makromolekülen (z.B. vollaromatische Polyesterkunststoffe), die sich in der

Schmelze parallelisieren und flüssigkristalline Strukturen erzeugen. Unterwirft man die flüssigkristalline Polymerschmelze einer Scher- oder Dehnströmung, wie das bei allen Thermoplast-Verarbeitungsprozessen (z.B. Spritzguss) der Fall ist, dann ordnen sich die starren Makromoleküle zu Fasern und Fibrillen, wie das Abbildung 3.4 schematisch zeigt.

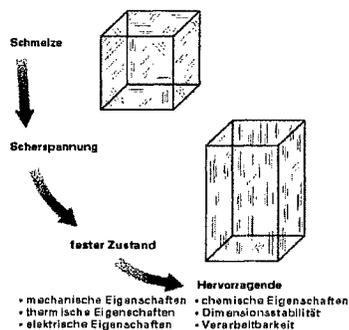


Abb. 3.4: Thermoplastische Verarbeitung eines flüssigkristallinen Polymers

In diesem Punkt unterscheidet sich LCP von allen anderen Thermoplasten: Je größer der Stress bei der Spritzgussverarbeitung ist, z.B. bei der Abformung von kleinsten Wandstärken, desto besser sind nach dem Erstarren die Materialeigenschaften.

Die Morphologie der flüssigkristallinen Polymere im Festzustand gleicht der von Holz. In die Matrix des LCP sind Fasern aus dem gleichen Polymer eingelagert, weshalb man auch von selbstverstärkenden Polymeren spricht. Dadurch werden die mechanischen Eigenschaften im Vergleich zu herkömmlichen Polymeren erheblich verbessert. Sie zeichnen sich selbst bei sehr hohen Temperaturen durch eine hervorragende Dimensionsstabilität und Kriechfestigkeit aus. Physikalische Eigenschaften wie z.B. Festigkeit, Steifheit und Wärmeausdehnung weisen aufgrund der Faserstruktur eine starke Richtungsanisotropie auf. Diese Anisotropie wird, im Gegensatz zu herkömmlichen Polymeren, durch Füll- und Verstärkungsstoffe wesentlich gemildert, weshalb nur verstärkte flüssigkristalline Polymere technische Bedeutung haben.

Aufgrund der Spritzgussverarbeitung, der Oberflächenrauigkeit und der Galvanisierbarkeit wird für die SMT-Substrate ein Werkstoff gesucht, der nicht mit Glasfaser verstärkt ist. Bei mit Mineralstoff gefüllten LCPs liegt allerdings die Wärmeformbeständigkeit (nach HDT/A) in der Regel um etwa 50 °C niedriger als bei mit Glasfaser gefüllten LCPs.

Besonders günstige Eigenschaften zeigen LCP-Werkstoffe bei der Spritzguss-Verarbeitung. In der Schmelze sind sie in der Lage, durch kleinste Öffnungen mit 200 µm Durchmesser zu fließen. Gerade in dünnwandigen Querschnitten werden die mechanischen Eigenschaften weiter verbessert, da die Moleküle einen noch höheren Ordnungszustand erreichen. Darüber hinaus ermöglichen sie aufgrund der geringen Schmelzwärme einen nahezu grafreien Spritzguss bei sehr kurzen Zykluszeiten von etwa 10 sec bis 20 sec. Gerade die kurzen Zykluszeiten machen eine kostengünstige Massenfertigung möglich, da die Maschinenkosten in der Regel weitaus höher als die Materialkosten sind.

Problematisch ist die schlechte Bindenahtfestigkeit der LCP-Werkstoffe. Trifft die LCP-Schmelze im Abformwerkzeug an einer Stelle aufeinander, so bildet sich dort eine mecha-

nisch nicht belastbare Bindaht, die bereits beim Entformen des Werkstücks brechen kann. Solche Bindahten lassen sich allerdings durch eine geeignete Werkzeug- bzw. Fließweggestaltung verhindern.

Der Materialpreis für 1 kg LCP beträgt für die hochtemperaturbeständigen mit Mineralstoff gefüllten Typen etwa 40 DM, womit LCP um den Faktor vier günstiger als PEEK und um den Faktor zwei teurer als PPS ist.

LCP-Werkstoffe finden Anwendung in elektrischen und elektronischen Bauteilen, in Kabeln und Verbindungsteilen der Faseroptik, in medizinischen Geräten, im Automobil- und Maschinenbau sowie in der Luft- und Raumfahrt. Auch für SMT-Komponenten gibt es bereits einige Anwendungsbeispiele [00H1], [99G1].

Epoxidharze für Packaging

Als Duroplaste unterscheiden sich die Epoxidharze in den thermischen Eigenschaften von Thermoplasten durch eine höhere Festigkeit und Steifheit bis hin zur Zersetzungstemperatur. Die Fa. Shin-Etsu bietet unter dem Namen 'KMC Series' [99S1] eine Reihe von Epoxidformmassen an, die speziell für das 'Packaging', also für die Umhüllung von Halbleiterkomponenten wie ICs und Einzelbauteile, entwickelt wurden.

Durch den gezielten Einbau von Silikon in die Epoxidharzmatrix wird hierbei eine sehr gute Hitzebeständigkeit, eine hohe Glasübergangstemperatur und gleichzeitig eine erhebliche Reduzierung der inneren Verspannungen im Epoxidharz erreicht. Die kurzzeitige Temperaturbeständigkeit dieses Materials (Typ: KMC-165-4) wurde in einem 450 °C heißen Lötbad für etwa 10 sec erfolgreich getestet.

Die in Tablettenform gelieferte Epoxidharzmasse wird durch Pressen bzw. Spritz-Pressen bei einem Einspritzdruck unterhalb von 10 bar verarbeitet. Die Verarbeitungstemperatur beträgt 175 °C, wobei laut mündlicher Mitteilung [00R1] das Fließverhalten dieses Werkstoffs mindestens genauso gut wie bei LCP ist. Die Erstarrungszeit beträgt etwa 20 sec und die Zykluszeit ohne Härten etwa 90 sec, also deutlich länger als beim Spritzgießen. Zusätzlich muss das Epoxidharz nach dem Abformen für mindestens zwei Stunden bei 180 °C gehärtet werden. Insgesamt wird durch diese lange Zykluszeit das SMT-Substrat deutlich teurer als beim Spritzgießen.

Mit dieser Formmasse sollen, was für Epoxidharze ungewöhnlich ist, Wandstärken von 0,1 mm möglich sein. Zusätzlich wird eine ausreichende mechanische Festigkeit und Wärmeformbeständigkeit bereits mit einer Mineralstoff-Füllung erreicht. Die stromlose Metallisierung dieses Werkstoffs ist mit ausreichender Haftung möglich [00B1].

Allerdings lässt sich eine Gratbildung aufgrund der geringen Viskosität des Materials bei der Verarbeitung nicht vermeiden, weshalb eine Nachbearbeitung (Deflashen) der SMT-Substrate unbedingt erforderlich wäre.

Bewertung von PPS, PEEK, LCP und Epoxidharz für SMT-Substrate

Was die elektrischen und mechanischen Anforderungen betrifft, wie sie in Kapitel 3.1 entwickelt wurden, so werden diese von allen vorgestellten Materialien genügend gut erfüllt. Die entscheidenden Kriterien für die Materialauswahl sind die Temperaturbeständigkeit, die Möglichkeiten der Verarbeitung, die Zykluszeit und die Materialkosten sowie die Möglichkeit der galvanischen Metallisierung. In Tabelle 3.7 werden diese Auswahlkriterien, die für die einzelnen Werkstoffe bereits diskutiert wurden, für die verschiedenen Werkstoffe in einer relativen Bewertung mit den Noten 1 bis 4 bewertet. In diesem qualitativen Vergleich zeigt sich LCP als der geeignetste Werkstoff.

	PPS <i>Fortron 6850L6</i>	PEEK <i>Victrix 450G</i>	LCP <i>E 820 i</i>	Epoxidharz <i>KMC-165-4</i>
Schmelztemperatur	4	2	3	1
Wärmeformbeständigkeit	4	2	3	1
Verarbeitung	1	4	2	3
Wandstärke	3	4	1	2
Zykluszeit	2	3	1	4
Nachbearbeitung	2	3	1	4
Materialpreis	1	4	3	2
Metallisierung (galv.)	4	1	2	3
Gesamt	2,6	2,9	2,0	2,5

Tab. 3.7: Qualitativer Eignungsvergleich von PPS, PEEK, LCP und Epoxydharz für die SMT-Anwendung (1 = Gut geeignet; 4 = Ungeeignet)

PPS scheidet aufgrund der ungenügenden Temperaturbeständigkeit und Metallisierbarkeit aus, PEEK aufgrund der schwierigen und teuren Verarbeitung.

LCP und Epoxidharz liegen in der Bewertung nicht weit auseinander: Kritisch erscheint bei LCP ist die Wärmeformbeständigkeit. Für das Epoxidharz gibt es zum Einen wenig Informationen bezüglich der galvanischen Metallisierung; außerdem konnten keine Verarbeiter gefunden werden, die Formteile mit ähnlich kleinen Strukturen und engen Toleranzen, wie es für die SMT-Substrate erforderlich ist, gefertigt haben. Im Gegensatz dazu sind für LCP solche Verarbeiter bekannt. Deshalb erscheint LCP als der geeignetste Werkstoff für die SMT-Substrate.

Auswahl eines geeigneten LCP-Materials

Im europäischen Raum sind die wichtigsten Anbieter für LCP-Werkstoffe die Firmen Ticona und DuPont, welche beide galvanisierbare, mineralgefüllte Hochtemperatur-Polymere anbieten. Das Standardprodukt für diese SMT-Anwendung ist bei Ticona das LCP-Material E 820 i und bei DuPont das Material 6330. Darüber hinaus wurden beide Werkstoffe in Zusammenarbeit mit der Fa. Siemens (Unternehmensgruppe PL EA) im Bereich der Metallisierbarkeit und der Temperaturbeständigkeit weiter zu den Produkten Ticona H 840 bzw. DuPont 7738 verbessert. Diese sind allerdings noch Entwicklungsprodukte, zu denen es bisher keine vollständigen Datenblätter gibt. Beide Werkstoffe können ohne Verletzung von Schutzrechten für die SMT-Substrate verwendet werden. In Tabelle 3.8 sind diese Werkstoffe zusammengestellt.

LCP-Typen	Schmelztemperatur	Formbest. HDT/A	Füllung
Ticona E 820 i	335 °C	220 °C	30 Gew. % Mineral
Ticona H 840	335 °C	≥ 240 °C	40 Gew. % Mineral
DuPont 6330 NC	335 °C	244 °C	30 Gew. % Mineral
DuPont 7738	335 °C	≥ 300 °C	38 Gew. % Mineral
DuPont 7738-S	335 °C	≥ 300 °C	Besonders geringe Korngröße der Füllung

Tab. 3.8: Galvanisierbare, mineralgefüllte Hochtemperatur-LCPs von Ticona und DuPont

Mit der 7000er-Serie bietet DuPont ein Polymer, das im Vergleich die höchste Temperaturbeständigkeit aufweist, weshalb der Werkstoff DuPont 7738-S aufgrund der Wärmeformbeständigkeit und der geringen Korngröße des Füllstoffs für diese SMT-Anwendung am besten geeignet ist.

3.4 Substratdesign

3.4.1 Anforderungen in Bezug auf Wirtschaftlichkeit und Prozesstechnik

Die Fertigungskosten für ein Bauelement sind proportional zu N^{-1} , wobei N die Anzahl der auf einem Substrat integrierten Spulenkörper ist. Die Anzahl der integrierten Spulenkörper N ergibt sich aus dem Produkt von Integrationsdichte n und Substratgröße A, weshalb für die Stückkosten gilt:

$$\text{Stückkosten} \propto \frac{1}{n \cdot A} \quad (3.3)$$

Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens sollen im Folgenden die Grenzen für die Integrationsdichte und die Substratgröße aufgezeigt werden.

Substratgröße

Die Substratgröße wird einerseits durch die Substratfertigung und andererseits durch den Photolithographieprozess begrenzt. Da ‚Step and Repeat‘-Verfahren zur Substratbelichtung nicht die erforderliche Tiefenschärfe erreichen, wird die Substratgröße durch Kontaktbelichtungsmaschinen auf Abmessungen von maximal 200 mm (rund oder quadratisch) begrenzt [99K1].

Bei der Herstellung der Substrate wird die Substratgröße zum Einen durch die einzuhaltenen Toleranzen zwischen den Justiermarken und den einzelnen Spulenkörpern und zum Anderen durch die Länge der Fließwege und den Einspritzdruck begrenzt. Was die Fertigungstoleranzen betrifft, so gehören CDs mit einem Durchmesser von 120 mm zu den kompliziertesten Spritzgussobjekten. Anders als bei CDs hat man in unserem Fall keine geschlossene Scheibe, sondern eine Vielzahl von Kavitäten mit unterschiedlichen Durchmessern. Diese zu füllen bedarf es bei gleicher Fläche eines wesentlich höheren Einspritzdruckes, weshalb mit einem Anspritzpunkt ein Substrat mit \varnothing 120 mm nicht hergestellt werden kann [00A2]. Die Erkundigung bei Spritzgießereien, die LCP verarbeiten, führt zu der Einschätzung, dass die Obergrenze für die Substratabmessungen bei der Verwendung von mehreren Anspritzpunkten bei 100 mm liegt.

Integrationsdichte

Für die Baugröße 0402 beträgt die maximale Flächendichte aufgrund der Kippung der Spulenkörper um 45° zum Substrat $1,4$ Spulenkörper pro mm^2 . Zum Vereinzeln der Spulenkörper z.B. mit einer Diamantsäge werden Haltestege mit einer Länge von etwa $300 \mu\text{m}$ an den Stirnseiten benötigt. Der Herstellungsprozess erfordert einen Mindestabstand von

200 μm zwischen den Seitenkanten der einzelnen Spulenkörper. Daraus ergibt sich eine theoretische Obergrenze von $0,7 \text{ mm}^{-2}$ für die Integrationsdichte. Da zur mechanischen Stabilisierung des Substrats die Spulenkörper in eine Wabenstruktur aus Stegen eingebettet werden müssen und auch die Justiermarken, der Substratrand und die Verteilerstrukturen für die Spritzgussfertigung zusätzlich Fläche auf dem Substrat verbrauchen, reduziert sich die technisch realisierbare Integrationsdichte auf $0,2$ bis $0,3 \text{ mm}^{-2}$.

Die Überlegungen zur Substratgröße und zur Integrationsdichte zeigen, dass sich maximal 2400 Spulen gleichzeitig prozessieren lassen. Angestrebt wird ein Wert von mindestens 1000.

Spulenkörperdimensionen und Verankerung im Substratverband

Bei der Gestaltung der Haltestege, die zur Verankerung der Spulenkörper im Substrat dienen, treten zwei unterschiedliche Anforderungen in Konkurrenz: Einerseits soll der Haltesteg durch einen möglichst großen Querschnitt die Stabilitätsanforderungen erfüllen. Andererseits soll die Querschnittsfläche möglichst klein bleiben, da der Bereich der Haltestege an den Lötflächen der Spulenkörper nicht metallisiert wird und so unter Umständen die verbleibende Fläche zum Löten zu klein wird. Des Weiteren muss der Haltesteg symmetrisch zu der Lötfläche liegen, damit die elektrischen Eigenschaften nicht durch die Einbaulage des Spulenkörpers beeinflusst werden. Idealerweise wird die Lötfläche so durch den Haltesteg durchtrennt, dass die Wirbelstromverluste in den Lötflächen minimal werden. Abbildung 3.5 zeigt die möglichen Varianten für die Haltestege.

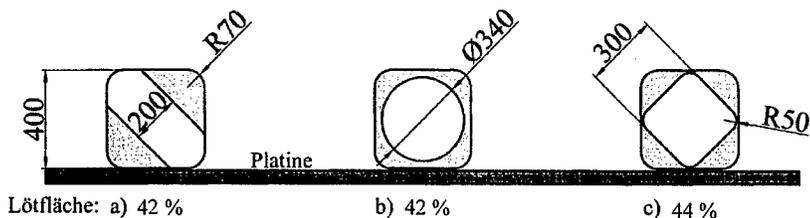


Abb. 3.5: Mögliche Querschnittsformen für die Haltestege (in μm) zur Verankerung der Spulen im Substratverband; die graue Fläche bleibt für die Lötmenisken übrig (Lötfläche in %)

Bei allen Varianten verbleibt eine Lötfläche von gut 40 %. Variante a) ist asymmetrisch, weshalb die elektrischen Eigenschaften durch die Einbaulage beeinflusst werden. Bei Variante b) werden die Wirbelstromverluste nicht vollständig unterdrückt. Nur Variante c) kann beide Anforderungen erfüllen.

Von der SMT Bauform 0402 muss die Dicke der Kupferwindungen einschließlich der Schutzpassivierung bzw. des Kupfer-Nickel-Zinn-Schichtstapels an den Stirnseiten abgezogen werden, um zu den eigentlichen Spulenkörperdimensionen zu gelangen. Abbildung 3.6 zeigt das angestrebte Spulenkörperdesign einschließlich der Haltestege zum Substrat (Abmessungen in μm). Eine Verrundung der Spulenkörperkanten wird aufgrund der photolithographisch erzeugten Galvanoform notwendig (Kapitel 4.2.4, Seite 65 ff).

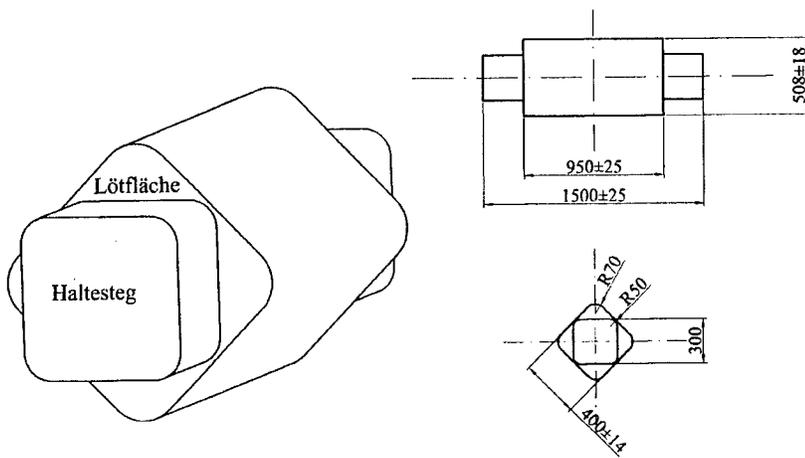


Abb. 3.6: SMT 0402-Spulenkörper mit Haltestegen zum Substrat (Abmessungen in μm)

Aus Stabilitätsgründen müssen mehrere Spulenkörper zu einer Zelle zusammengefasst werden, die von einem festen Rahmen umschlossen ist. Abbildung 3.7 zeigt exemplarisch einen solchen Verband, wobei hier sechs Spulenkörper zu einer Elementarzelle der Größe $4,5 \text{ mm} \times 4,5 \text{ mm}$ zusammengefasst werden, was einer Integrationsdichte von $0,3 \text{ mm}^{-2}$ entspricht.

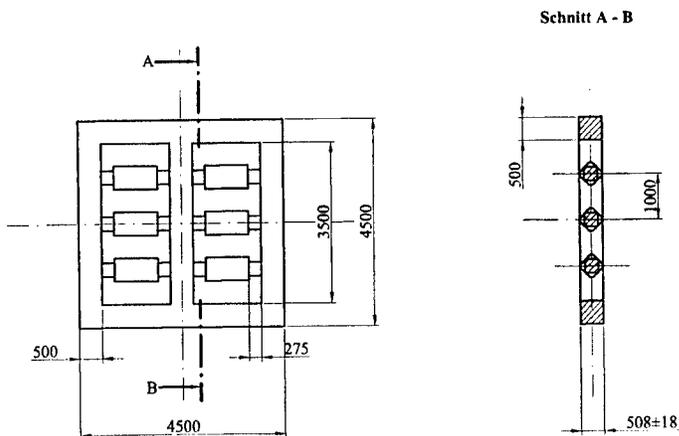


Abb. 3.7: Elementarzelle mit 6 Spulenkörpern (Abmessungen in μm)

Damit sich die Spulenkörper durch einfache Schnitte, z.B. mit einer Diamantsäge, vereinzeln lassen, können die Elementarzellen nur in einem Gitternetz oder in einer Wabenstruktur, wie sie Abbildung 3.8 zeigt, angeordnet werden. Einschließlich Waferrand führt eine solche Anordnung der Spulenkörper zu einer Integrationsdichte von $0,25 \text{ mm}^{-2}$.

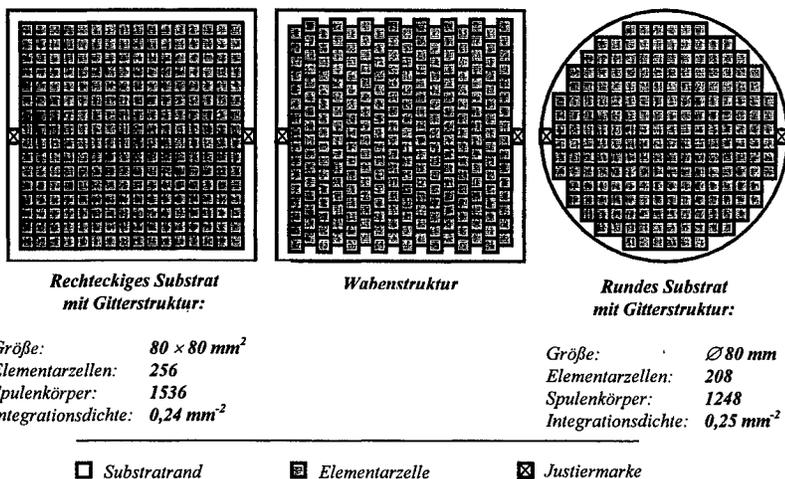


Abb. 3.8: Prinzipiell mögliche Anordnung der Elementarzellen auf einem Substrat

Justiermarken

Die Leiterbahnen der Spulenwindungen werden durch einen doppelseitigen Photolithographieprozess erzeugt. Damit kein merklicher Versatz in den Leiterbahnen entsteht, müssen die Photolithographiemasken für Vorder- und Rückseite des Substrats auf mindestens $\pm 5 \mu\text{m}$ genau zueinander justiert werden. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten:

1. Justiermarken auf beiden Substratseiten: Damit die Justiermarken auf beiden Substraten möglichst genau aufeinander liegen, wird die Struktur der Marke im Substrat komplett ausgespart. Im einfachsten Fall kann ein Bohrloch im Substrat als Justiermarke dienen. Die Genauigkeit der Justiermarken zueinander wird dann durch die Abweichung vom ideal senkrechten Bohrwinkel bestimmt. Abbildung 3.9 zeigt eine einfache Justiermarkenstruktur, die am Rand des Wafers aufgebracht ist. Befinden sich Justiermarken auf beiden Wafersseiten, so kann eine Standardbelichtungsmaschine ohne Zusatzausstattung verwendet werden.

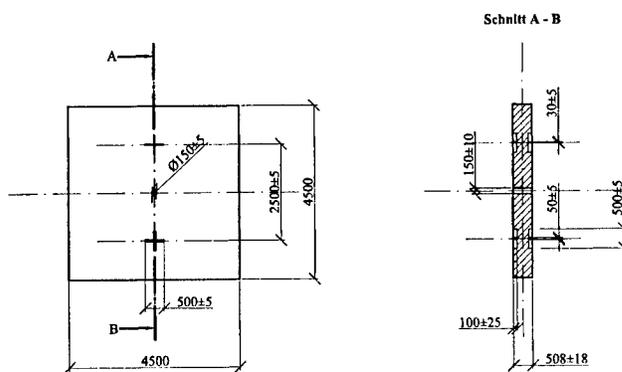


Abb. 3.9: Justiermarkenstruktur für doppelseitigen Photolithographieprozess

2. Justiermarke nur auf einer Substratseite: Von der Fa. Karl Süss wird ein komplettes System¹ als Zusatzausstattung für Belichtungsmaschinen angeboten, mit dem sich Substrate doppelseitig belichten lassen, wobei sich die Justiermarken nur auf einer Substratseite befinden [99K2]. Die Justiergenauigkeit der Masken zueinander beträgt $\pm 5 \mu\text{m}$. Abbildung 3.10 verdeutlicht das Prinzip.

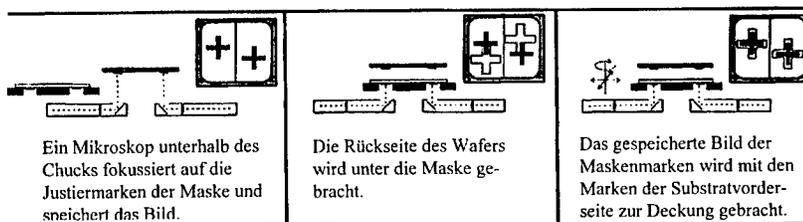


Abb. 3.10: Doppelseitige Photolithographie mit Justiermarken nur auf einer Waferseite

Erforderliche Positionsgenauigkeit der Spulenkörper zu den Justiermarken

Ein Versatz δb zwischen den Windungen auf der Substratvorder- und Rückseite wird zum Einen durch die Fehljustierung der Lithographiemasken zueinander und zum Substrat, bezeichnet als δb_{Maske} , und zum Anderen durch eine Fehlpositionierung der Spulenkörper zu den Justiermarken auf dem Substrat, bezeichnet als $\delta b_{\text{Substrat}}$, verursacht.

¹ SUSS Bottomside Alignment, kurz: BSA-System

$$|\delta b| = |\delta b_{\text{Maske}}| + |\delta b_{\text{Substrat}}| \quad (3.4)$$

Abbildung 3.11 zeigt beispielhaft einen Windungsversatz um $\delta b \approx 15 \mu\text{m}$ an der Spulenseitenkante, wobei die Windungen $50 \mu\text{m}$ breit sind.

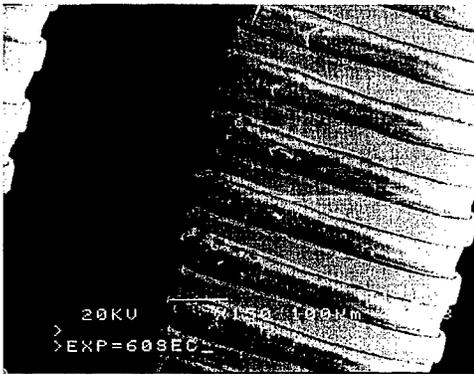


Abb. 3.11: Windungsversatz an der Spulenseitenkante

Eine Fehljustierung δx_{Maske} zwischen den Photolithographiemasken, welche parallel zu den Spulenkörperkanten verläuft, bewirkt einen entsprechenden Versatz zwischen den Spulenkörperwindungen. Deshalb ist die Fehljustierung zwischen den Lithographiemasken die Toleranz mit dem kritischsten Effekt. Mit Standardbelichtungsmaschinen kann bei einem doppelseitigen Lithographieprozess ohne größeren Aufwand eine Genauigkeit von $5 \mu\text{m}$ erreicht werden, weshalb gilt:

$$|\delta b_{\text{Maske}}| = |\delta x_{\text{Maske}}| \approx 5 \mu\text{m} \quad (3.5)$$

Eine Positionsungenauigkeit zwischen Spulenkörper und Justiermarken ist bei exakt zueinander justierten Lithographiemasken weitaus weniger kritisch. Eine Verschiebung parallel zur Spulenkörper-Hauptachse wird bis $50 \mu\text{m}$ dadurch ausgeglichen, dass der Spulenkörper länger als der Windungsbereich ist. Bei einer Verschiebung $\delta x_{\text{Substrat}}$ senkrecht zur Spulenkörper-Hauptachse resultiert ein Windungsversatz in Abhängigkeit von der Steigung α der Windungen:

$$\delta b_{\text{Substrat}} = 2 \cdot \delta x_{\text{Substrat}} \cdot \tan \alpha \quad (3.6)$$

Abbildung 3.12 zeigt schematisch, wie sich eine Verschiebung senkrecht zur Hauptachse auf den Windungsversatz auswirkt. Das schraffierte Trapez gibt in Abhängigkeit von der Spulenkörperposition die Breite des verbleibenden Windungsquerschnitts an der Spulenseitenkante an.

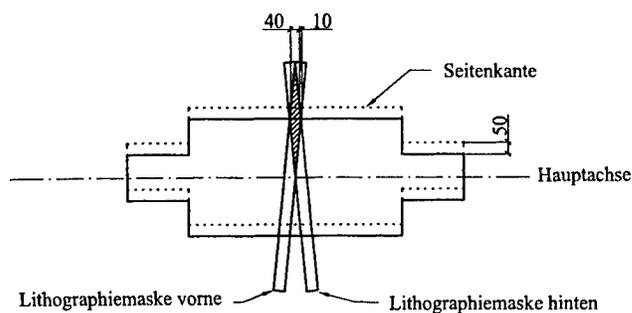


Abb. 3.12: Windungsversatz durch Abweichung von der Idealposition (Abmessungen in µm)

Für den Fall, dass der Windungsabstand der Windungsbreite entspricht, lässt sich die Steigung der Windung aus der Windungsbreite w und der Substratdicke¹ d berechnen:

$$\sin \alpha = \frac{w}{d} \quad (3.7)$$

Da hier $\alpha \ll 1$ ist, gilt in guter Näherung $\tan \alpha \approx \sin \alpha$, womit sich aus (3.4) und (3.6) die maximal zulässige Fehlpositionierung $\delta x_{\text{Substrat}}$ zwischen Spulenkörper und Justiermarken abschätzen lässt:

$$\delta x_{\text{Substrat}} \approx \frac{(|\delta x| - |\delta x_{\text{Maske}}|) \cdot d}{2 \cdot w} \quad (3.8)$$

Mit $\delta b = 7 \mu\text{m}$, $\delta b_{\text{Maske}} = 5 \mu\text{m}$, $d = 508 \mu\text{m}$ und $w = 20 \mu\text{m}$ ergibt sich so eine **Fertigungstoleranz von 25 µm** für die Positionsgenauigkeit der Spulenkörper zu den Justiermarken.

3.4.2 Technische Realisierung der Nutzenfertigung

Ein Substrat entsprechend Kapitel 3.4.1 durch Spritzguss ausschließlich aus LCP zu fertigen, das etwa 1000 Spulenkörper integriert, scheint aus folgenden Gründen schwer möglich zu sein:

1. Die Querschnitte der Fließwege variieren bei Haltesteg, Spulenkörper und Elementarzellenrahmen zwischen $0,1 \text{ mm}^2$ und $0,5 \text{ mm}^2$. Bei der Abformung von etwa 200 Elementarzellen mit insgesamt 1200 Kavitäten führt das dazu, dass sich eine Vielzahl von Bindenähten ausbildet und dass Kavitäten nur unzureichend gefüllt werden.
2. Bei der Vielzahl an Kavitäten wird der Einspritzdruck zu groß und ein sauberes Entformen ist nicht mehr möglich.

¹ Substratdicke = Diagonale Abmessung des Spulenkörperquerschnitts

3. Eine Positionsgenauigkeit von mindestens $\pm 25 \mu\text{m}$ zwischen Spulenkörper und Justiermarke kann nicht für jeden Spulenkörper erreicht werden.
4. Bei mehreren Anspritzpunkten, die hier in jedem Fall erforderlich sind, wird eine ausreichende Versteifung des Substrats nicht erreicht, da sich die einzelnen Einspritzbereiche nur unzureichend und unter Ausbildung von Bindenähten verbinden lassen.

Aus diesem Grund wird hier mit einer Hybridtechnik ein neuer Weg verfolgt. Das versteifende Grundelement für das Substrat bildet ein metallischer Trägerstreifen, in den die einzelnen Elementarzellen gespritzt werden. Als Metall soll Bronze verwendet werden, dessen Ausdehnungskoeffizient mit $18 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ etwa dem von LCP gleich ist (in Abhängigkeit von der Fließrichtung $8 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ bis $20 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$). Die Dicke des Metallträgers beträgt $0,15 \text{ mm}$. Das Metallband kann aufgrund der Reproduzierbarkeit von Stanzwerkzeugen über die gesamte Breite mit einer Genauigkeit von $10 \mu\text{m}$ in allen Abmessungen gefertigt werden. Abbildung 3.13 zeigt einen Entwurf für das Metallband, nach dem derzeit die ersten Testsubstrate gefertigt werden.

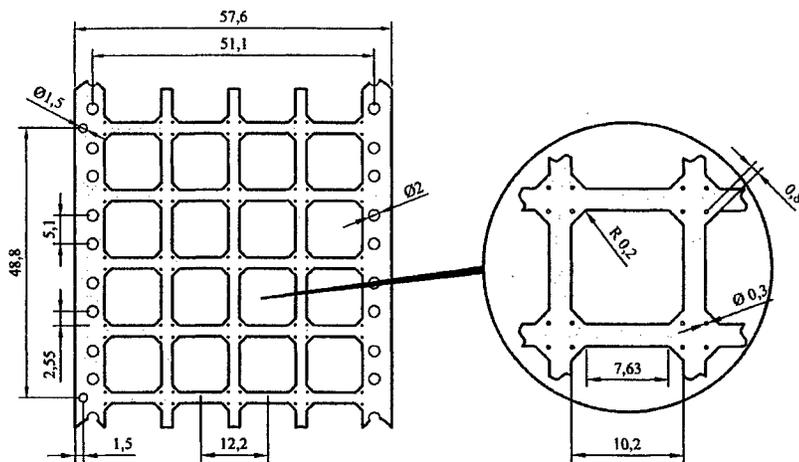


Abb. 3.13: Metallband aus Bronze (in mm) als Trägermaterial für die Elementarzellen aus LCP

In die einzelnen Aussparungen des Metallstreifens werden die Elementarzellen mit den Spulenkörpern gespritzt. Abbildung 3.14 zeigt die Elementarzelle der Testsubstrate, die 20 Spulenkörper beinhaltet. Die Justiermarken sind als kreisförmige Erhebungen mit einem Radius von 100 bzw. $200 \mu\text{m}$ am oberen und unteren Rand der Zelle realisiert. Der Anspritzpunkt befindet sich im Zentrum der Elementarzelle. Von dort breitet sich der flüssige Kunststoff gleichförmig zum Rand der Zelle aus, weshalb Bindenähte nur am äußeren Rand der Zelle entstehen können. Für die Spritzgussabformung empfiehlt sich ein 8fach-Werkzeug, das mit einem Schuss zwei Reihen mit jeweils vier Zellen des Metallträgerstreifens füllt.

Auf diese Weise entsteht ein Gefüge, das in xy-Richtung bei geringsten Fertigungstoleranzen eine hohe Steifigkeit aufweist, aber in z-Richtung aufgrund der Elastizität des Metall-

trägerstreifens flexibel bleibt und auf eine Spule mit großem Radius gerollt werden kann. Der Metallträger lässt sich sowohl als Endlosband oder aber in Streifen mit einer bestimmten Länge, z.B. 200 mm, was noch auf einer Standardbelichtungsmaschine auf einmal belichtet werden kann, weiter verarbeiten.

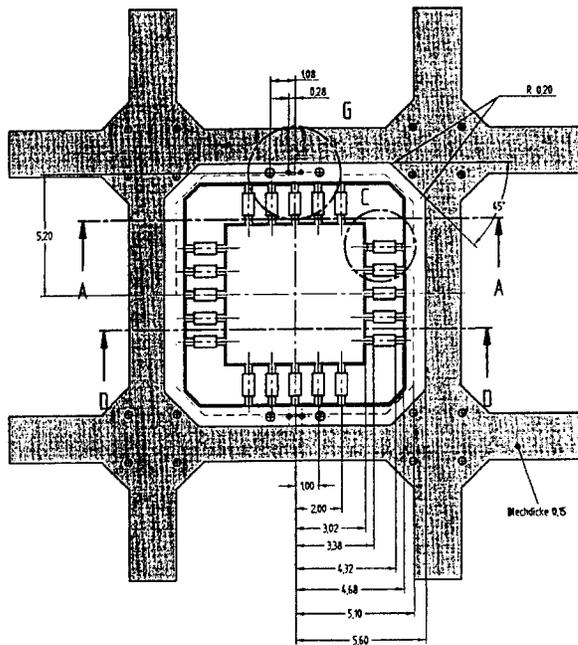


Abb. 3.14: Einzelne Elementarzelle aus LCP mit 20 Spulenkörpern

Ein Metallstreifen mit 16 Reihen, also einer Länge von 197,2 mm, lässt sich so mit 8 Schuss befüllen. Die Gesamtzykluszeit für ein SMT-Testsubstrat dieser Länge beträgt dann etwa 2 bis 3 min für 1280 Spulenkörper (64 Elementarzellen mit jeweils 20 Spulenkörpern). Für die endgültige Massenproduktion sollen in eine Elementarzelle etwa 30 Spulenkörper integriert werden.

Aufgrund der angestrebten Induktivitätstoleranz und des Photolithographieprozesses müssen bei der Substratherstellung sehr geringe Fertigungstoleranzen eingehalten werden. Diese sind in Tabelle 3.9 nochmals zusammengefasst. Dabei kann die Abweichung vom planmäßigen Absolutwert durchaus größer sein. Wichtig ist, dass die gefertigten Maße möglichst genau reproduziert werden.

Fertigungstoleranz für die	Begründung	Mindestens	Ziel
Länge des Spulenkörper	Produktspezifikation	$\pm 50 \mu\text{m}$	$\pm 25 \mu\text{m}$
Spulenposition relativ zu den Justiermarken	Photolithographie	$\pm 25 \mu\text{m}$	$\pm 15 \mu\text{m}$
Breite / Höhe des Spulenkörpers	Induktivitätstoleranz von 5 %	$\pm 14 \mu\text{m}$	$\pm 6 \mu\text{m}$
Justierkreuze	Photolithographie	$\pm 5 \mu\text{m}$	$\pm 3 \mu\text{m}$

Tab. 3.9: Fertigungstoleranzen für das Substrat

3.5 Nutzenfertigung von Labormustern mittels Laserablation

Da die Kosten eines Musterwerkzeugs für die Spritzgussabformung eines Labormustersubstrats etwa 100.000 DM betragen [00A2], wurden die Testsubstrate für die Prozessentwicklung kostengünstig mittels Laserablation hergestellt. Als Basismaterial wurden 730 µm dicke Folien aus dem Polyimid Cyrlex CL 3000 HN von der Fa. DuPont verwendet, welches sich aufgrund seiner mechanischen Eigenschaften gut mit dem Laser bearbeiten lässt und Dauergebrauchstemperaturen von 360 °C standhält. Dieser Hochleistungswerkstoff ist mechanisch sehr belastbar und mit allen Prozessschritten verträglich. Von Nachteil ist lediglich die hohe Wasseraufnahme, weshalb abgeschiedene Schichten auf ungetemperten Cyrlex-Folien eine geringe Haftfestigkeit aufweisen.

Für die Laserablation wurde ein Kryptonfluorid-Excimer-Laser verwendet. Tabelle 3.10 zeigt die Leistungsmerkmale und die damit erzielte Ablationsrate des Lasers.

<i>KrF-Excimer-Laser</i>	
Wellenlänge	248 nm
Pulsrate	max. 50 Hz
Pulsenergie	500 mJ bis 1200 mJ
Pulslänge	ca. 25 nsec
Ablationsrate	0,1 bis 0,3 µm / Puls

Tab. 3.10: Leistungsdaten des KrF-Excimer-Lasers für die Polyimid-Ablation

Abbildung 3.15 zeigt eine REM-Aufnahme eines Spulenkörpers, der mit Laserablation bei der Fa. Bartels Mikrotechnik gefertigt wurde. Die Form des Spulenkörpers entspricht zwar nur annähernd der Bauform 0402, auch weichen die Anschlussstege zum Substrat deutlich vom geplanten Design ab; dennoch ließen sich mit diesen Substraten erste Demonstratoren mit hoher Güte realisieren.

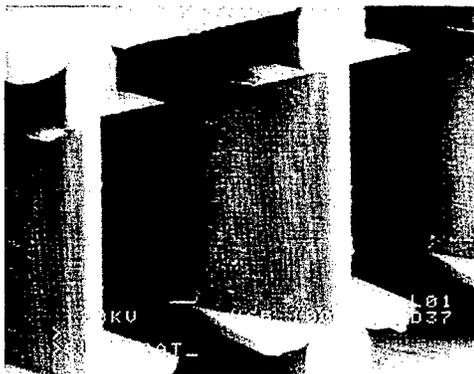


Abb. 3.15: REM-Aufnahme eines Spulenkörpers; hergestellt mit Laserablation bei der Fa. Bartels Mikrotechnik

Deutlich zu erkennen ist der Unterschied zwischen der verrundeten und relativ glatten Oberkante des Spulenkörpers und der scharfwinkligen und rauen Seitenkante (siehe auch Abbildung 3.16). Dies ist durch den Herstellungsprozess bedingt. Das Polyimid wird, ähnlich wie bei einem doppelseitigen Lithographieprozess, von beiden Substratseiten abgetragen, wobei das Laserlicht durch eine Maske fällt, die die Struktur auf das Substrat überträgt. Die Ablationstiefe wird durch die Belichtungszeit bzw. Pulszahl bestimmt. Die schrägen Seitenflanken entstehen dadurch, dass der Scan-Bereich des Lasers immer mehr in Richtung Seitenkante verkleinert wird. An der Seitenkante selbst wird das Substrat durchgeätzt. Deshalb lässt sich mit diesem Verfahren keine Kantenverrundung erzielen. Auf so scharfen Seitenkanten kann der Photolack nicht mit ausreichender Dicke abgeschieden werden. Geeignete Spulenkörper müssen deshalb eine Kantenverrundung von mindestens $50\ \mu\text{m}$ aufweisen.

Abbildung 3.16 zeigt den Querschnitt eines solchen Spulenkörpers im Vergleich zur SMT-Nennbauform 0402. Die Diagonalabmessungen sind horizontal um etwa 30 % und vertikal um etwa 40 % größer als durch die Baugrößennorm vorgegeben.

Die 'Nasen' an den Seitenkanten entstehen dann, wenn die Laserablationsmaske bei der Bearbeitung der Substratvorder- und -rückseite nicht hinreichend genau zueinander justiert wurde. Zusätzlich zu den scharfen Seitenkanten wird die Leiterbahnabformung durch diese 'Nasenbildung' erschwert. Beides zusammen führt beim Herstellungsprozess in vielen Fällen zu einer Bruchstelle in den Photolackstegen genau an der Seitenkante. An solchen Bruchstellen bilden sich bei der galvanischen Kupferabscheidung parasitäre Strompfade zwischen den einzelnen Windungen aus, welche die Güte der Spule drastisch vermindern.

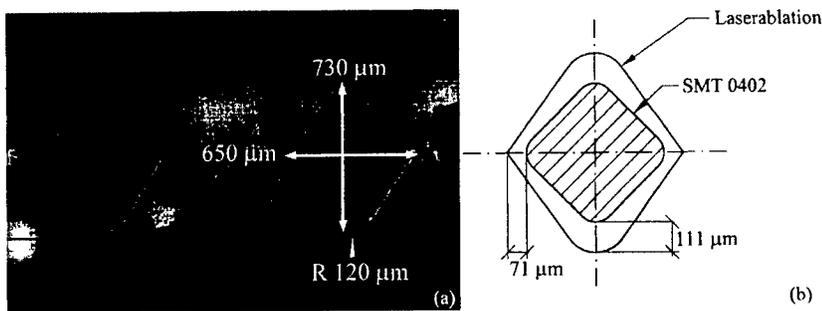


Abb. 3.16: a) Querschnitt durch einen Spulenkörper, hergestellt mit Laserablation
b) Vergleich des Querschnitts mit der SMT-Bauform 0402 (Abmessungen in μm)

Unabhängig von der Seitenkantenproblematik erweist sich die Herstellung der Spulenkörper mittels Laserablation aufgrund der hohen Fertigungsungenauigkeiten als ungeeignet. Die Schwankungen in den Abmessungen sind zum Teil erheblich und nicht reproduzierbar. Darüber hinaus sind die Justiermarken auf Substratvorder- und -rückseite für den doppelseitigen Lithographieprozess nicht hinreichend genau zueinander justiert. Idealerweise muss hier eine Positionsgenauigkeit von $\pm 5\ \mu\text{m}$ gefordert werden. Wie aber Abbildung 3.17 zeigt, ist der tatsächliche Versatz mit typischerweise $80\ \mu\text{m}$ deutlich größer.

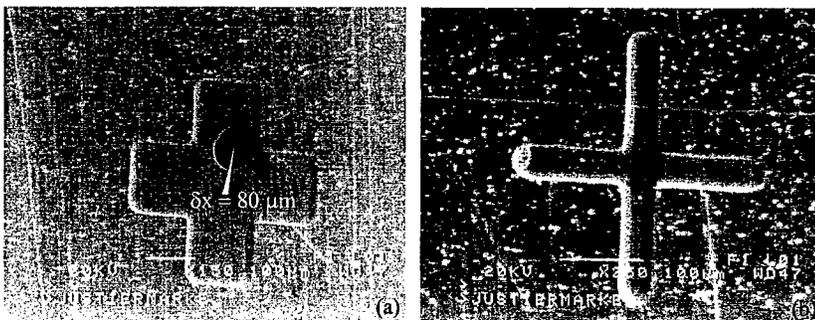


Abb. 3.17: Justierkreuze für den doppelseitigen Lithographieprozess:
 a) Das Loch markiert die zentrale Justiermarkenposition auf der anderen Substratseite
 b) Die Breite der Justierkreuze schwankt zum Teil erheblich

Teilweise zeigen die mit dem Laser behandelten Flächen eine sehr hohe Defektdichte mit bis zu 100 μm hohen Spitzen. Diese entstehen bei der Ablation, wenn entweder die Substrate nicht ausreichend gereinigt wurden oder wenn das Polyimidmaterial geringfügige Inhomogenitäten aufweist (Abbildung 3.18).

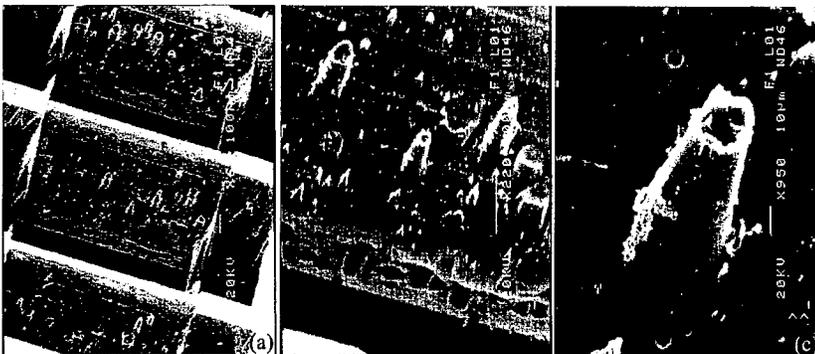


Abb. 3.18: Ablationsdefekte auf den Spulenkörpern der Fa. Bartels Mikrotechnik. Die Ursache dafür kann sowohl eine Inhomogenität im Substratmaterial wie auch eine ungenügende Reinigung der Substrate vor der Ablation sein.

Insgesamt ist die Laserablation zwar ungeeignet für die Herstellung hochpräziser MST-Substrate, aber die Labormuster haben es ermöglicht, eine Semi-Additivtechnik für die

Massenfertigung von SMT-Spulen zu entwickeln. Abbildung 3.19 zeigt eine im Semi-Additivverfahren gefertigte Spule im Vergleich zu einer industriell mit Laserwendeln gefertigten Spule der Baugröße 0603.

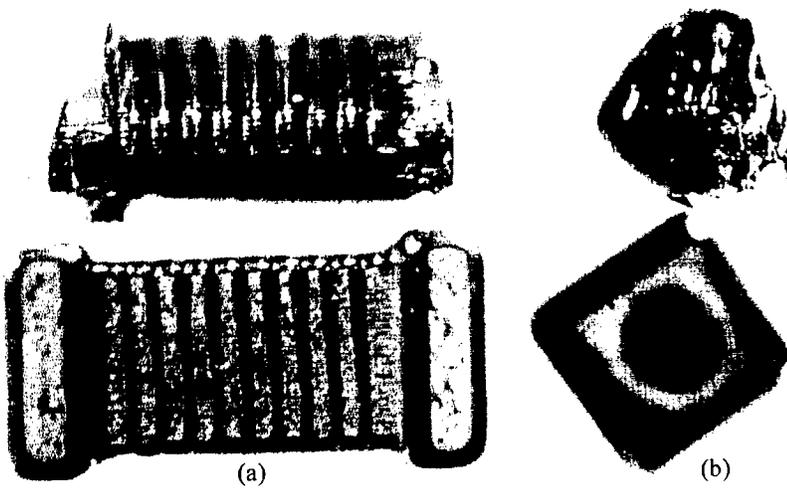


Abb. 3.19: Spulenkörper der Fa. Bartels Mikrotechnik im Vergleich mit der SMT-Bauform 0603:
a) Windungsbereich; b) Stirnflächen bzw. Lötkontakte

4. Technologie der Mikrostrukturabformung

Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte für die Semi-Additivtechnik zur Herstellung der Leiterbahnen von einlagigen Induktivitäten auf nicht-planaren Polyimid-Substraten entwickelt. Abbildung 4.1 zeigt die Prozessabfolge unter Verweis auf das entsprechende Unterkapitel.

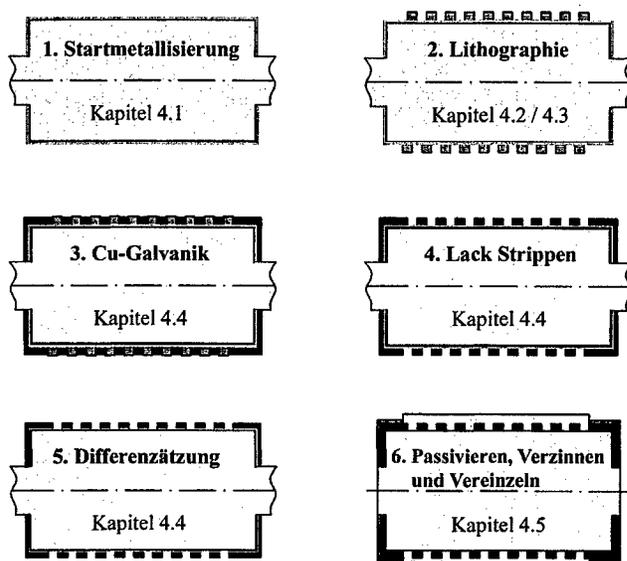


Abb. 4.1: Schematische Darstellung der Prozessabfolge zur Herstellung von Induktivitäten mit der Semi-Additivtechnik

4.1. Flächenmetallisierung

Die Flächen- bzw. Startmetallisierung übernimmt bei der elektrochemischen Abscheidung die Kathodenfunktion. Nur auf ausreichend vormetallisierten Bereichen, die einen geschlossenen Strompfad bilden und eine ausreichende Stromtragfähigkeit aufweisen, lassen sich homogene Kupferschichten mit geringer Korngröße galvanisch abscheiden.

Die Flächenmetallisierung stellt die Schnittstelle zwischen den Spulenwindungen und dem Substrat dar, weshalb eine ausreichende Haftung zwischen dem Substrat und der Flächenmetallisierung sowie zwischen der Flächenmetallisierung und der galvanischen Kupferschicht gewährleistet sein muss. Die folgenden Anforderungen werden an die Flächenmetallisierung gestellt:

- Gute Haftung auf dem Substrat ($> 0,6 \text{ N/mm}^2$),
- gute Haftung des galvanisch abgeschiedenen Kupfers ($> 0,6 \text{ N/mm}^2$),
- gute Leitfähigkeit,
- Beständigkeit gegen den stark sauren Elektrolyten,
- homogene Abscheidung auf nicht-planaren Substraten,
- selektive Ätzbarkeit gegen die Kupferwindungen,
- kostengünstiges Material und Abscheideverfahren.

4.1.1 Metalle als Startmetallisierung

Die Haftung und die galvanische Kupferabscheidung aus einem sauren Elektrolyten wurde an den sieben Metallen Titan, Aluminium, Chrom, Nickel, Kupfer, Platin und Gold getestet. Vor der Metallabscheidung war eine Reinigung der Substrate unbedingt notwendig.

Reinigung der Polyimid-Substrate

Ohne Reinigung lassen sich die Polyimidsubstrate aufgrund von organischen Verunreinigungen, Partikeln und angelagertem Wasser nicht mit ausreichender Haftung metallisieren, weshalb sie im Ultraschallbad mit Aceton und Isopropanol für jeweils 10 min gereinigt und anschließend gründlich mit DI-Wasser gespült wurden (Tabelle 4.1).

Da Polyimid als Werkstoff in der Mikrosystemtechnik im Vergleich zu Silizium wesentlich mehr Wasser im Bulk einlagert und an der Oberfläche absorbiert, müssen die Substrate vor einer trockenen Schichtabscheidung (PVD, CVD¹) für mindestens zwei Stunden bei 120 °C getempert werden. Ansonsten wird die Haftung durch das Wasser stark vermindert.

Reinigung der Polyimidsubstrate		
1	Aceton	10 min Ultraschallbad
2	Isopropanol	10 min Ultraschallbad
3	DI-Wasser	Rinser
4	Trocknen bei 120 °C	Mind. 2 h im Umluftofen

Tab 4.1: Standardreinigung der Polyimidsubstrate mit organischen Lösungsmitteln

Haftung

Auf die gereinigten Substrate wurden die Metallschichten physikalisch mittels DC-Sputtern oder thermischen Verdampfens bei Raumtemperatur abgeschieden. Die Haftung wurde mit einem Klebeband (Tape Test mit Tesa Film) qualitativ untersucht. Außerdem wurde versucht, ob sich die Schichten mit Lösungsmitteln abreiben lassen (Tab. 4.2). Insgesamt war die Haftung von Chrom, Platin und Kupfer am besten.

¹ PVD = Physical Vapour Deposition; CVD = Chemical Vapour Deposition

Metall	Abscheideverfahren	Haftung		
		Tape	Aceton	Gesamt
Chrom	DC-Sputtern	1	4	+
Platin	DC-Sputtern	4	1	+
Kupfer	Verdampfen	3	3	+
Titan	DC-Sputtern	5	2	0
Gold	DC-Sputtern	2	6	0
Aluminium	DC-Sputtern	7	5	-
Nickel	DC-Sputtern	6	7	-



Tab. 4.2: Haftung der ausgewählten Metalle auf Polyimid im Vergleich.
1 = Sehr gut geeignet; 7 = Ungeeignet

Eignung für galvanische Kupferabscheidung

Die sieben verschiedenen Metalle wurden als Startmetallisierung verwendet, um aus einer sauren Kupfersulfatlösung metallische Mikrostrukturen abzuscheiden. Tabelle 4.3 zeigt qualitativ das Ergebnis der Abscheidung bezüglich Korngröße¹ und Haftung sowie das elektrochemische Potential [74O1] und den spezifischen Widerstand [00W1] der Metalle. Kupfer haftet schlecht auf Metallen, die in der elektrochemischen Spannungsreihe ein negativeres Standardpotential als Cadmium besitzen [79E1], wie beispielsweise Aluminium, Titan und Chrom.

Metall [Kation]	φ_0 [V]	ρ [$\mu\Omega\text{cm}$]	Korngröße	Haftung	Gesamt
Kupfer [Cu ²⁺]	+ 0,34	1,7	1	1	+
Platin [Pt ²⁺]	+ 1,20	10,6	3	2	+
Gold [Au ³⁺]	+ 1,42	2,2	2	4	+
Nickel [Ni ²⁺]	- 0,23	8,7	4	3	0
Chrom [Cr ²⁺]	- 0,86	12,7	5	5	-
Titan [Ti ⁺]	- 1,75	40	6	6	-
Aluminium [Al ³⁺]	- 1,66	2,7	7	7	-

Tab. 4.3: Galvanische Kupferabscheidung auf den ausgewählten Metallen
 φ_0 : elektrochemisches Standardpotential; ρ : spez. Widerstand
1 und + = Sehr gut geeignet; 7 und - = Ungeeignet

Kupfer, Platin und Gold sind als Startmetallisierung für die Abscheidung von homogen glatten Schichten mit geringer Korngröße aus einem sauren Kupferelektrolyten hervorragend geeignet.

Selektives Rückätzen gegen die Kupferwindungen

Als weiteres Auswahlkriterium gilt, dass sich die Startmetallisierung mit hoher Selektivität gegen das galvanisch abgeschiedene Kupfer ätzen lässt. Trockenchemische Ätzverfahren sind in ihrer Wirkung gerichtet und für Metalle aufwändig und teuer. Da die Startmetallisierung auf beiden (nicht-planaren) Substratseiten entfernt werden muss, ist das nasschemische Rückätzen am besten geeignet. Tabelle 4.4 zeigt mögliche Ätzlösungen (ohne Konzentrationsangaben) für die einzelnen Metalle sowie eine qualitative Wertung der Selektivität gegenüber Kupfer [76P1].

¹ diese wurde qualitativ mit dem Elektronenmikroskop untersucht

Metall	Ätzlösung	Selektivität
Aluminium	HF HNO ₃ H ₂ SO ₄ NaOH KOH HNO ₃ + HCl + HF etc...	+
Titan	HF + H ₂ O ₂ HF + HNO ₃ HF + H ₂ SO ₄ etc...	+
Kupfer	HCl + FeCl ₃ HNO ₃ H ₂ SO ₄ HCl + (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈ etc...	0
Chrom	HCl + HNO ₃ HNO ₃ + HF HCl + HNO ₃ + C ₃ H ₈ O ₃ etc...	0
Nickel	HNO ₃ HNO ₃ +CH ₃ COOH HCl + HNO ₃ etc...	0
Gold	HCl + HNO ₃ KCN + (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	-
Platin	HCl + HNO ₃ KCN + (NH ₄) ₂ S ₂ O ₈	-

Tab. 4.4: Chemische Ätzlösungen für die ausgewählten Metalle
(+ = Gut geeignet; - = Ungeeignet)

Auswahl eines Metalls

In Tabelle 4.5 werden die einzelnen Auswahlkriterien für die untersuchten Metalle zusammengestellt und qualitativ bewertet. Dieser Vergleich und darüber hinaus der Aspekt einer Startmetallisierung mit dem gleichen Material wie die Windungen sprechen für eine Flächenmetallisierung aus Kupfer.

Metall	Haftung	Galvanik	Differenz-ätzen	Leitfähigkeit	Preis	Gesamt
Kupfer	3	1	3	1	4	2,4
Aluminium	6	7	1	3	1	3,6
Chrom	1	5	4	6	3	3,8
Gold	5	3	6	2	6	4,4
Nickel	7	4	5	4	2	4,4
Platin	2	2	7	5	7	4,6
Titan	4	6	2	7	5	4,8

Tab. 4.5: Qualitative Bewertung der Auswahlkriterien für die Startmetallisierung
1 = Sehr gut geeignet; 7 = Ungeeignet

4.1.2 Abscheideverfahren für nicht-planare Substrate

PVD-Verfahren sind in der Ausbreitung stark gerichtet und damit ungeeignet für eine homogene Schichtabscheidung auf nicht-planaren Substraten [00F1]:

Beim thermischen Verdampfen breiten sich die Metallatome ballistisch aus. Deshalb werden nur die Bereiche der Substratoberfläche erreicht, die auf der Sichtlinie zur Verdampferquelle liegen. Substratflächen, die senkrecht zur Verdampferquelle stehen, werden nicht erreicht.

Beim Sputtern breiten sich die Metallatome aufgrund des Arbeitsdrucks (etwa 10⁻² mbar; mittlere freie Weglänge < 1 mm) diffus aus. Eine Bedeckung von Oberflächen, die senkrecht zum Target stehen, wird erreicht. Allerdings ist die Abscheiderate auf solchen Flächen deutlich geringer als auf Flächen, die parallel zum Target stehen. Deshalb wird beim Sputtern keine homogene Schichtdicke auf nicht-planaren Substraten erreicht.

Bei CVD-Verfahren ist die Prozesstemperatur höher als die Wärmeformbeständigkeit der Kunststoffsubstrate. Sie kommen deshalb nicht in Betracht.

Bei nasschemischen Verfahren werden die abzuscheidenden Atome bzw. Moleküle in Form von Ionen bzw. Komplexen aus der Lösung an die Oberfläche des Substrats ge-

bracht, weshalb eine homogene Abscheidung überall dort erfolgt, wo die Lösung mit ausreichender Zirkulation, die für den Ionenaustausch erforderlich ist, an die Substratoberfläche gelangt. Somit sind nasschemische Verfahren für die Bedeckung der Ecken und Kanten von nicht-planaren Substraten am besten geeignet.

Für die stromlose, nasschemische Metallisierung¹ von Kunststoffen bietet die Fa. Atotech (Berlin) einen Standardprozess an, der in der vorliegenden Arbeit für die Herstellung der Startmetallisierung verwendet wird. In den Prozessschritten 1 bis 6 (Tabelle 4.6) werden in die Oberfläche des Polyimidsubstrats Mikrokavitäten geätzt, in die später das Kupfer abgeschieden wird. Die Verankerung der Kupferschicht in Mikrokavitäten gewährleistet die gute Haftung zwischen Kupfer und Polyimid. In den Prozessschritten 7 bis 10 wird die Substratoberfläche mit Palladium bekeimt. In den Prozessschritten 11 bis 13 wird das Palladium reduktiv durch Kupfer ersetzt. Anschließend wird die stromlos chemische Kupferschicht galvanisch auf eine Metallisierungshöhe von 0,5 µm verstärkt.

	Nr.	Prozess	Zeit	T [°C]
Kavitäten ätzen	1	Queller PAS (org. Lösungsmittel und Ameisensäure)	8 min	50
	2	Spülen	1 min	RT
	3	Beizen (140 g/l Na-Permanganat, 50 g/l Na-Hydroxid)	5 min	60
	4	Spülen	1 min	RT
	5	Reduzieren (15 ml H ₂ O ₂ in 5% Schwefelsäure)	5 min	45
	6	Spülen	1 min	RT
Palladium bekeimen	7	Aktivieren (Aktivator Noviganth AK I)	1 min	40
	8	Spülen	1 min	RT
	9	Beschleunigen (Aktivator Noviganth AK II)	2 min	RT
	10	Spülen	1 min	RT
Kupferfilm	11	Chemisch reduktive Metallisierung (Noviganth HC)	15 min	RT
	12	Spülen	1 min	RT
	13	Trocknen		Föhn

Tab. 4.6: Prozessschritte zur stromlos chemischen Abscheidung einer Kupferschicht auf Polyimid. (T = Prozesstemperatur; RT = Raumtemperatur)

Die abgeschiedenen Schichten haben sowohl den Tape Test wie auch den Lösungsmitteltest bestanden. Die Haftung ist besser als bei den durch Sputtern und Verdampfen abgeschiedenen Schichten. Abbildung 4.2 zeigt die Oberflächenmorphologie eines Polyimidsubstrates, das mit den Prozessschritten entsprechend Tabelle 4.6 metallisiert wurde (vor der galvanischen Verstärkung). Deutlich zu erkennen sind die Mikrokavitäten mit einem Durchmesser zwischen 0,5 und 4 µm.

Darüber hinaus kann folgendes Metallschichtsystem am Institut abgeschieden werden, welches als Startmetallisierung geeignet ist: Auf das Substrat wird eine 200 nm dicke Titanschicht mittels DC-Sputtern abgeschieden. Darauf wird die eigentliche Startmetallisierung für den Photolack und die Galvanik, eine 300 nm dicke Kupferschicht, mittels thermischen Verdampfens abgeschieden. Die Schichtdicken beziehen sich auf Substratflächen, die parallel zum Target liegen. Die minimale Schichtdicke, die man auf diese Weise auf dem Substrat erreicht, beträgt 200 nm. Die gesputterte Titanschicht ist erforderlich, um diejenigen Bereiche zu bedecken, die beim thermischen Verdampfen von Kupfer nicht erreicht werden.

¹ In diesem Zusammenhang soll auf die folgende Literatur hingewiesen werden: [00H1], [00K1], [00S1], [99O1], [99R1], [99T1].

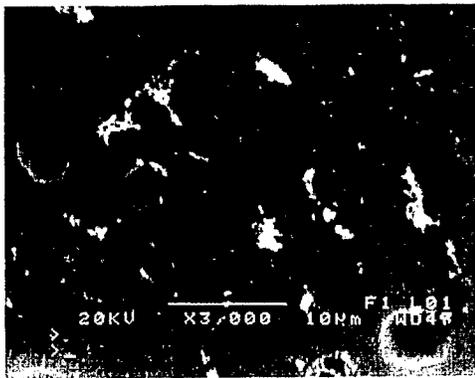


Abb. 4.2: Oberflächenmorphologie eines stromlos chemisch metallisierten Polyimidsubstrats

4.2 Photolithographische Erzeugung der Galvanoform

4.2.1 Photolacke

Für die Windungen wird eine Dicke von 20 μm und in Abhängigkeit von der Induktivität eine Breite von 10 μm bis 50 μm angestrebt. Dementsprechend muss sich der Photolack mit einer Dicke von 20 μm auftragen lassen und eine Linienbreite von 10 μm mit möglichst hoher Kantensteilheit ermöglichen. Die meisten Photolacksysteme aus der Halbleiterindustrie sind für Schichtdicken zwischen 0,1 μm und 4,0 μm optimiert und deshalb hier nicht geeignet [00A1]. Im Gegensatz dazu werden in der Mikrosystemtechnik und der Leiterplattentechnik Photolacke mit Schichtdicken bis zu 1000 μm verwendet. Tabelle 4.7 zeigt eine Auswahl solcher Lacke [98R1], [99M1].

Pos	Photoresist Bez.	Firma	Max. Lackdicke	System
1	ma-P 200	Micro Resist Technology	8 μm	Positiv
2	ma-N 400	Micro Resist Technology	10 μm	Negativ
3	Pepr 2400	Shibley	10 μm	Positiv
4	ma-P 1200	Micro Resist Technology	12 μm	Positiv
5	Eagle 2100 ED	Shibley	20 μm	Negativ
6	AR-P 322	Allresist	20 μm	Positiv
7	PMER P-LA 900	Tok (Japan)	50 μm	Positiv
8	AZ 9260	Hoechst (Clarion)	50 μm	Positiv
9	THB-30	JSR (Japan)	70 μm	Negativ
10	ma-P 100	Micro Resist Technology	80 μm	Positiv
11	AZ 4562	Hoechst (Clarion)	100 μm	Positiv
12	X AR-N 4400	Allresist	100 μm	Negativ
13	Epon SU8	Micro lithography Chemical Corp	1000 μm	Negativ

Tab. 4.7: Auswahl an Photolacken für Schichtdicken größer 8 μm

Die Stirnflächen der SMT-Spulenkörper stehen senkrecht zur Photolithographiemaske, weshalb der Photolack dort nicht belichtet werden kann. Da die Stirnflächen während der galvanischen Abscheidung nicht mit Photolack bedeckt sein dürfen, muss ein Photolack verwendet werden, der erst durch die Belichtung resistent gegen den Entwickler wird. Es kommt also nur ein Negativ-Resist für die Galvanoform in Frage.

Ähnlich wie bei der Abscheidung der Startmetallisierung stellt sich auf den nicht-planaren Substraten die Frage nach einer homogenen Lackierung. Dazu muss der Photolack aus einer niederviskosen Flüssigkeit, die alle Ecken und Kanten des nicht-planaren Substrats erreicht, an die Substratoberfläche gebracht werden. Folgende Verfahren stehen für die Lackierung zur Diskussion:

Spin-On-Lackierung

Standardmäßig werden homogene Lackschichten auf planare Substrate mit einem Wafer-Spinner, der das Substrat mit bis zu 10000 rpm rotieren lässt, aufgebracht. Die Zentripetalkraft treibt hierbei den Photolack ausgehend vom Wafermittelpunkt über das Substrat. Kleine Unebenheiten wie beispielsweise Staubkörner bewirken allerdings, dass sich hinter diesem Defekt eine unbelackte Fläche in Form eines Dreiecks radial zum Wafertrand hin ausbildet. Deshalb ist die Spin-On-Lackierung in dieser Form für nicht-planare Substrate ungeeignet [97M1].

Ein abgewandeltes Spin-On-Verfahren, bei dem der Wafer während der Lackierung im Lösungsmitteldampf rotiert, kann für die Belackung von nicht-planaren Substraten eingesetzt werden [00K1], [00P2]. Allerdings gibt es mit diesem Verfahren bis jetzt kaum Erfahrungen.

Sprühlackierung

Mit Lösungsmitteln ausreichend stark verdünnte Photolacke lassen sich z.B. mit einer Airbrush-Pistole auf das Substrat aufsprühen [99L1], [99S3]. Dies wurde hier mit dem für die Mikrosystemtechnik konzipierten Negativ-Resist Epon SU8 versucht. Mit diesem optisch transparenten Lack, der sich auch im nahen UV-Bereich durch eine geringe Absorption auszeichnet, können Schichtdicken von 2 µm bis 1000 µm abgeschieden und eine sehr gute Kantensteilheit sowie ein sehr hohes Aspektverhältnis erreicht werden. Der Lack wird vom Hersteller in sechs unterschiedlichen Viskositäten für die nominellen Schichtdicken 2, 5, 10, 25, 50 und 100 µm angeboten. Für die Sprühlackierung muss der Lack noch zusätzlich verdünnt werden. Dazu ist entweder Aceton oder das vom Hersteller angebotene γ-Butyrolacton [96L1] gut geeignet. Es wurden die Lacke SU8-5 und SU8-50 untersucht, wobei die letzte Zahl die nominelle Schichtdicke für einen Spin-On bei 2500 rpm angibt.

Als problematisch erwies sich bei der Sprühlackierung, dass die hier verwendete Airbrush-Düse aufgrund der hohen Viskosität des Photolacks unregelmäßig größere Lackspritzer aussendet, die entweder zu Luftpfehlungen oder zur Tröpfchenbildung am Substrat führen. Die Defektgröße kann durch eine stärkere Verdünnung des Photolacks so weit reduziert werden, dass die Defekte beim Softbake ausheilen. Die besten Belackungsergebnisse können mit SU8-50 erzielt werden, wobei dieser im Verhältnis 1:1,5 bis 1:2 mit Aceton verdünnt wird und der Stickstoffdruck beim Sprühen 2,5 bar beträgt.

Tauchlackierung

Alternativ zur Sprühlackierung wurde mit dem Photoresist SU8-50 die Tauchlackierung als mögliches Belackungsverfahren untersucht. Verfahrenstechnisch ist die Tauchlackierung

in der Handhabung der Sprühlackierung überlegen, zumal in einem einzigen Schritt beide Substratseiten belackt werden. Allerdings bilden sich beim Abtropfen des Photolacks durch die Oberflächenspannung an den Ecken und Kanten Lackwülste, die bis zu einem Faktor 10 gegenüber dem restlichen Photolack überhöht sind. Deshalb muss der Resist bei diesem Verfahren noch stärker verdünnt werden als bei der Sprühlackierung. Die besten Ergebnisse wurden mit einer Acetonverdünnung von 1:5 erzielt. Insgesamt ist die Homogenität der Lackschichtdicke nicht befriedigend.

Elektrophoretische Lackierung

Bei der elektrophoretischen Lackierung (oder einfach nur Elektrotauchlackierung) wird der Photolack elektrochemisch aus der Lösung an der metallischen Anode, dem metallisierten Substrat, abgeschieden. Dabei enthält der Lack Bindemittel mit Carbonsäuregruppen, welche in der ionisierten Form wasserlöslich und in der undissoziierten Form wasserunlöslich sind [98H1]. Im elektrischen Feld wandern die R-COO⁻-Ionen des Bindemittels zur Anode. Gleichzeitig bleiben bei der anodischen Sauerstoffentwicklung¹ Protonen zurück, welche mit den Anionen des Bindemittels protonieren und an der Substratoberfläche einen wasserunlöslichen, festhaftenden und elektrisch isolierenden Niederschlag bilden. Die Lackabscheidung beginnt dort, wo die elektrische Feldstärke am größten ist. Auf beschichteten Substratflächen bricht die weitere elektrochemische Reaktion zusammen. Sie setzt sich auf ungünstig gelegenen Substratflächen mit anfangs geringer Feldstärke fort, bis letztendlich das ganze Substrat homogen dick beschichtet ist. Damit ist eine sichere, gleichmäßige Belackung auch kompliziert geformter Oberflächen möglich. Deshalb ist die elektrophoretische Lackierung besonders gut für nicht-planare Substrate geeignet. Wegen der schlechten Leitfähigkeit der Elektrolytlösung und der gegen Ende der Beschichtung langen Stromwege ist im Vergleich zur galvanischen Metallabscheidung eine relativ hohe Zellspannung erforderlich (Faktor 50 bis 300 höher). Aufgrund der anodischen Sauerstoffentwicklung steigen während der Lackierung am Substrat Gasblasen auf. Diese können sich an der Substratoberfläche anlagern und an dieser Stelle die Lackabscheidung blockieren. Die Anlage von Gasblasen lässt sich durch eine Substratbewegung während der Abscheidung weitgehend vermeiden. Allerdings kann der aufsteigende Sauerstoff auch eine oxidative Zersetzung der Bindemittelmoleküle bewirken, weshalb inzwischen bevorzugt die kathodische Elektrotauchlackierung eingesetzt wird, bei der analoge Reaktionen an der Kathode zur Lackabscheidung führen.

4.2.2 Elektrophoretische Lackierung mit dem Eagle 2100

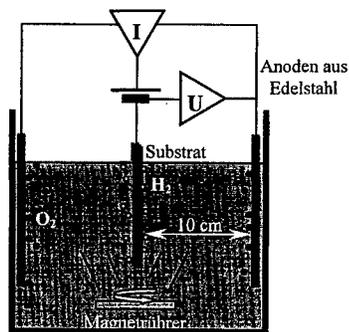
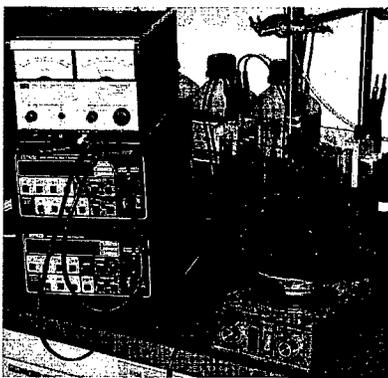
Für die elektrophoretische Lackierung bietet die Fa. Shipley zwei Photolacke an: Zum Einen den Positiv-Lack Pepr 2400 und zum Anderen den Negativ-Lack Eagle 2100 [96L6], [96C1]. Da aufgrund der Stirnflächen der Spulenkörper nur ein Negativ-Lack in Frage kommt, wurde hier der Photolack Eagle 2100 verwendet. Die Photolacklösung ist eine wässrige Emulsion mit einem Feststoffgehalt von etwa 10 %. Die wasserlöslichen, organischen Partikel haben eine Größe von etwa 100 nm und beinhalten neben dem Bindemittel, dem Photoinitiator und dem Farbstoff zur Kontrastverbesserung das Monomer für die Vernetzung. Im sauren Medium werden die Feststoffpartikel positiv geladen, weshalb sie im elektrischen Feld zur Kathode wandern, wo sich das Substrat befindet. Die kathodische Wasserstoffentwicklung aufgrund der elektrolytischen Zersetzung des Wassers erzeugt in

¹ Elektrolytische Zersetzung von H₂O

der unmittelbaren Umgebung des Substrats eine alkalische Atmosphäre, in der die Feststoffpartikel wasserunlöslich werden und sich auf der Substratoberfläche niederschlagen [95K1], [89V1].

Experimentelle Einrichtung

Für Laborversuche ist eine einfache Anordnung ohne kontinuierliche Mikrofiltration der Photolacklösung ausreichend. Der Photolack wurde in einem Aquariumglas mit den Abmessungen $18\text{ cm} \times 18\text{ cm} \times 13\text{ cm}$ abgeschieden. Um eine möglichst homogene Belackung zu erzielen, wurde mit zwei symmetrisch zueinander angeordneten Plattenanoden aus Edelstahl gearbeitet, wobei die vom Elektrolyten benetzte Fläche $8\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ betrug. Der Abstand zwischen Substratvorder- bzw. -rückseite und den Anoden betrug dabei 100 mm . Abbildung 4.3 zeigt den einfachen Laboraufbau schematisch. Zusätzlich kann mit Hilfe eines beheizbaren Wasserbades, in dem sich das Aquariumglas befindet, die Temperatur des Elektrolyten im Bereich von $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ auf $\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ genau geregelt werden. Während der Lackabscheidung wird mit einem Magnetrührer der Einschluss von H_2 -Gasblasen im Photolack verhindert. Der Strom wird mit einer Konstantstromquelle auf 50 mA geregelt, bis die Potenzialdifferenz zwischen Anode und Kathode, welche gegen Ende der intrinsisch begrenzten Abscheidung exponentiell anwächst, 150 V beträgt. Dann wird das Substrat von der Stromquelle getrennt, um eine elektrolytische Zersetzung des Photolacks zu verhindern. Es ist anzumerken, dass der Abscheidestrom über einen weiten Bereich variiert werden kann und letztendlich durch die Stromtragfähigkeit der Startmetallisierung begrenzt wird. Der Abscheidvorgang selbst benötigt nur etwa 30 sec bis 60 sec .



2,5 lit. Badansatz

Abb. 4.3: Experimenteller Aufbau zur elektrophoretischen Tauchlackierung

Abbildung 4.4 zeigt die Strom- und Spannungskennlinie für eine elektrophoretische Lackierung. Nach 48 sec bricht die Abscheidung zusammen, wobei die Spannung aufgrund des isolierenden Verhaltens des Photolacks exponentiell ansteigt.

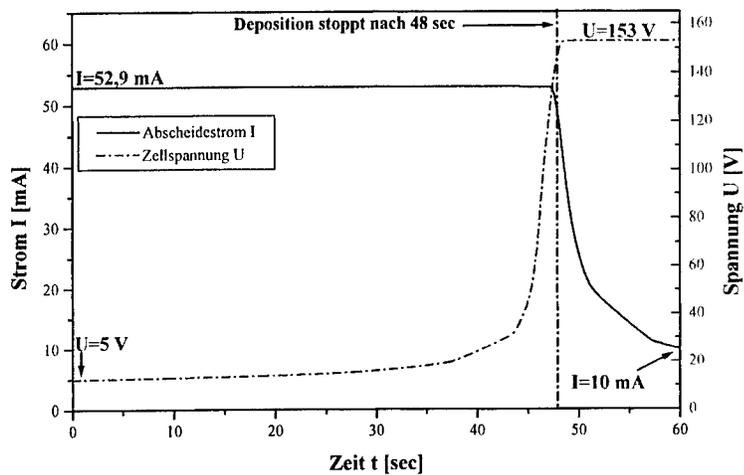


Abb. 4.4: Strom- und Spannungskennlinie der elektrophoretischen Lackierung

Nach der elektrochemischen Abscheidung muss das Substrat mit DI-Wasser gespült werden, um Elektrolytrückstände an der Substratoberfläche zu entfernen, die sonst eintrocknen und Wülste von bis zu einigen 100 μm Dicke bilden.

Wie Abbildung 4.5 zeigt, scheidet sich der Lack sehr homogen an allen Stellen des Substrats ab. Selbst die Stirnflächen der Spulenkörper sind vollständig belackt. Eine so homogene Belackung konnte weder mit der Sprüh- noch mit der Tauchlackierung erzielt werden.



Abb. 4.5: Belackter Spulenkörper (60-fache Vergrößerung)

Photolackdicke

Im Gegensatz zur galvanischen Metallabscheidung lässt sich die Lackdicke nicht über das Integral der Stromstärke nach der Zeit beeinflussen, sondern nur über das Verhältnis der einzelnen Elektrolytkomponenten zueinander und die Verdünnung mit DI-Wasser, die Badtemperatur während der Abscheidung und geringfügig über die Spannung zwischen Kathode und Anode [99S2], [00S3].

Hier wurde lediglich die Lackdicke in Abhängigkeit von der Badtemperatur untersucht. Der Photolack Eagle wurde entsprechend Anleitung im Verhältnis 1:2 mit DI-Wasser angesetzt und bei Temperaturen zwischen 22 °C und 45 °C abgeschieden. Abbildung 4.6 zeigt das Ergebnis. Bei einer Temperatur von 22 °C beträgt die Lackdicke $(18 \pm 2) \mu\text{m}$, was für die angestrebte Windungsdicke von 20 μm geeignet ist.

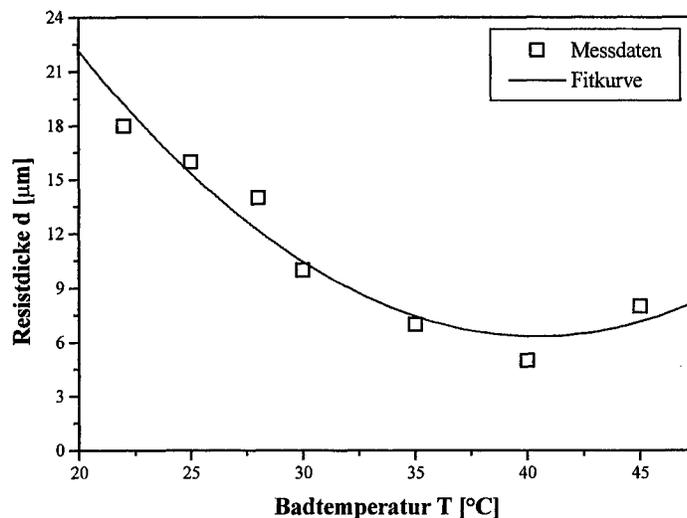


Abb. 4.6: Eagle-Lackdicke in Abhängigkeit von der Abscheidetemperatur

4.2.3 Prebake mit minimiertem Photolack-Reflow

Um gute Belichtungsergebnisse mit hoher Auflösung und guter Kantensteilheit erzielen zu können, muss der Photolack Eagle vor der Belichtung gebacken werden. Dieser als Prebake bezeichnete Temperaturschritt dient dazu, das während der Abscheidung im Lack eingelagerte Wasser sowie Lösungsmittel auszutreiben und die photoinduzierte Vernetzung der Polymere vorzubereiten. Darüber hinaus wird die Haftung zum Substrat durch den Prebake wesentlich verbessert.

Für planare Substrate ist ein Prebake von 12 min bei einer Temperatur von 110 °C im Umluftofen zu empfehlen. Mit dem Wasserverlust ist ein Volumenschwund verbunden, was an scharfen Kanten dazu führt, dass sich der Lack in Gebiete mit minimaler Flächenkrümmung zurückzieht, um die eigene Oberflächenspannung zu minimieren (Abb. 4.7). Dies erweist sich besonders bei der Lackierung der scharfen Spulenkörperseitenkanten als problematisch, da dort in Abhängigkeit von der Backtemperatur und der Backzeit nur noch ein 0,1 µm bis 5 µm dicker Lack zurück bleibt. Bei der galvanischen Abscheidung der Kupferwindungen führt das dazu, dass die Windungen entlang der Seitenkante kurzgeschlossen werden (Abb. 4.8).

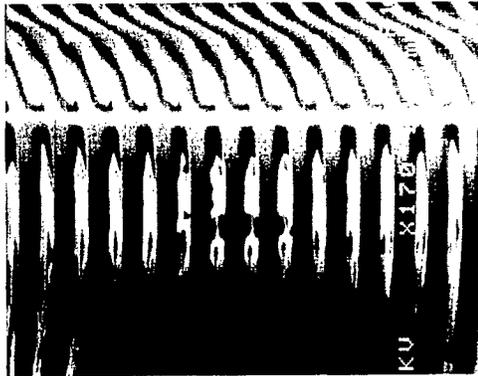


Abb. 4.7: Unbelackte Spulenkörperkante nach dem Prebake (400-fache Vergrößerung)



Abb. 4.8: Kurzschlüsse an der Spulenseitenkante (500-fache Vergrößerung)

Mit fünf unterschiedlichen Ansätzen wurde versucht, die Seitenkante mit ausreichender Dicke zu belacken (Tabelle 4.8, Seite 64):

Verzichtet man ganz auf einen Prebake, so sind die photolithographischen Eigenschaften des Lacks bzgl. Kantensteilheit und Auflösungsvermögen nicht ausreichend für diese Anwendung. Deshalb wurden die Prebake-Temperatur und die Prebake-Zeit variiert: Der Photolack wurde bei den Temperaturen 85 °C, 75 °C, 65 °C und 55 °C für jeweils 30 min, 20 min, 10 min und 5 min gebacken. In allen Fällen war die Lackdicke an der Seitenkante deutlich geringer als 10 µm. Zudem wurde die Lackhaftung mit kürzerer Backzeit und niedrigerer Temperatur drastisch schlechter.

Dann wurde versucht, das Substrat nach einer ersten Lackabscheidung mit anschließendem Prebake nochmals zu belacken. In diesem Fall konnte aber kein Lack an der Seitenkante abgeschieden werden. Grund dafür ist, dass sich der Photolack beim Prebake nicht komplett von der Seitenkante zurückzieht. Es bleibt immer eine dünne Lackschicht zurück, die nach dem Prebake so isolierend wirkt, dass kein Ladungsträgertransport und damit keine zweite Lackabscheidung möglich ist.

Alternativ wurde versucht, die Seitenkante nach einem kompletten Lithographieprozess einschließlich Belichten und Entwickeln nochmals zu belacken. Damit wird der gesamte Lithographieprozess insgesamt zweimal durchlaufen. Hierbei wurde eine Belackung der Seitenkante erzielt, dennoch war das Ergebnis nicht befriedigend. Der Photolack bildet beim zweiten Lithographieschritt an den bereits bestehenden Photolackstegen Wülste, die die Kantensteilheit und die Auflösung zunichte machen. Auch im Hinblick auf Wirtschaftlichkeit und schnelle Durchlaufzeiten ist dieses Verfahren ungeeignet. Abbildung 4.9 zeigt die Seitenkante nach einem zweifachen Lithographieprozess.



Abb. 4.9: Spulenseitenkante nach einem zweifachen Lithographieprozess

Der erfolgreichste Ansatz zur Belackung der Seitenkante war, bis zur galvanischen Kupferabscheidung auf eine Temperaturbehandlung völlig zu verzichten. Der Prebake im Umluftofen wurde durch einen Softbake im Vakuum ersetzt [97H1], [98H3]. Beim Softbake im Vakuum wird dem Photolack ebenso das Wasser und restliche Lösungsmittel entzo-

gen, weshalb es auch hier zu einem Volumenschwund kommt. Da man sich bei Raumtemperatur deutlich unterhalb der Glastemperatur des Polymers befindet, kommt es hier nicht zu einem Reflow des Photolacks. Allerdings wurde beobachtet, dass der Photolack an sehr scharfen Seitenkanten aufreißt (Abb. 4.10). Hier werden die Spannungen aufgrund des Volumenschwundes so groß, dass sich der Photolack durch die Bildung eines Risses entlang der Seitenkante Entspannung verschafft.

<i>Prozess</i>	<i>Probleme</i>	<i>Bewertung</i>
Kein Prebake	Keine Haftung und sehr schlechte photolithographische Eigenschaften	--
Minimierung von Backtemperatur und Backzeit	Keine ausreichende Lackdicke an der Seitenkante	-
Belacken – Prebake – Belacken	Keine Lackabscheidung an der Kante bei der zweiten Lackierung	--
Zweifacher Photolithographieprozess	Justierung; Lackabscheidung an der Kante unzureichend; Wülste	-
Softbake im Vakuum	Schlechtere Photolackhaftung	+

Tab. 4.8: Unterschiedliche Prozessvarianten, um eine Belackung der Seitenkante zu erreichen

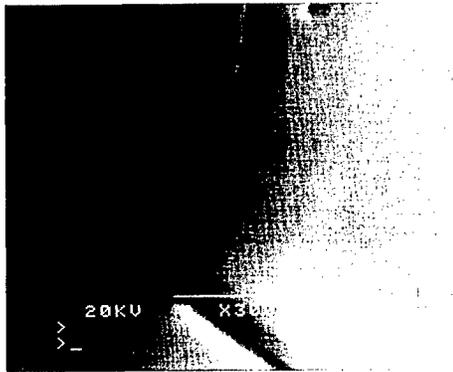


Abb. 4.10: Riss im Photolack Eagle an der Spulenseitenkante

Dieser Softbake wurde unter Hochvakuumbedingungen bei einem Druck von 4×10^{-5} mbar und unter Vorvakuumbedingungen bei einem Druck von 8×10^{-3} mbar untersucht. Das Ergebnis war bei beiden Drücken identisch, weshalb für die weiteren Softbake-Versuche die Vakuumkammer nur mit einer Vorpumpe bei dem Enddruck von 8×10^{-3} mbar betrieben wurde.

Eine Softbake-Zeit zwischen zwei und vier Stunden hat sich am besten bewährt. Mit einem kürzeren Softbake können dem Photolack das Wasser und die Lösungsmittel nicht vollständig entzogen werden. Ein längerer Softbake führt zu einem übermäßigen Aushärten

des Lackes, ist aber weniger kritisch. Insgesamt wird die Lackdicke an der Spulenkörperseitenkante durch den Vakuum-Softbake um etwa 20 % reduziert.

4.2.4 Belackung und Belichtung auf runden Spulenkörpern

Das Problem des Photolack-Reflows ist nur auf Substraten mit variierender Oberflächenkrümmung gegeben und zeigt sich am stärksten an spitzwinkligen Kanten. Aus diesem Grund wurde alternativ versucht, runde Spulenkörper, in diesem Fall Drahtstücke mit einem Durchmesser von 0,70 mm und 1,00 mm zu belackern und zu belichten. Der Prebake kann hier standardmäßig bei einer Temperatur von 110 °C für 12 min durchgeführt werden. Die Drahtstücke konnten mit guter Haftung sehr homogen lackiert werden.

Allerdings erweist sich bei den runden Spulenkörpern die Belichtung des Photolacks als problematisch. Hier entstehen, wie Abbildung 4.11 zeigt, entlang der Tangente seitlich am Spulenkörper sehr lange Lichtwege durch die Photolackschicht. Der Photolack Eagle ist aber im Gegensatz zu dem Lack Epon SU8 stark absorbierend und nicht transparent. Die Intensität des Lichts fällt im Lack exponentiell ab, weshalb sich auch mit sehr langen Belichtungszeiten nur Schichtdicken bis maximal 100 µm vollständig durchbelichten lassen.

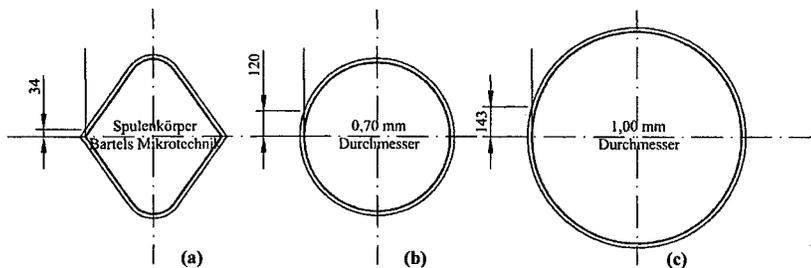


Abb. 4.11: Effektiv zu belichtende Lackdicke d_{eff} an der Spulenkörperseitenkante für
 a) Spulenkörper von Bartels Mikrotechnik: $d_{\text{eff}} = 34 \mu\text{m}$
 b) Runder Spulenkörper mit 0,70 mm Durchmesser: $d_{\text{eff}} = 120 \mu\text{m}$
 c) Runder Spulenkörper mit 1,00 mm Durchmesser: $d_{\text{eff}} = 143 \mu\text{m}$

Belichtungszeiten von bis zu 10 min haben nicht ausgereicht, um den Bereich um die Seitenkante an Spulenkörpern mit 1,0 mm Durchmesser vollständig zu belichten. Gemäß Abbildung 4.11 beträgt hierbei die effektiv zu belichtende Lackdicke an der seitlichen Tangente 143 µm.

Für runde Spulenkörper ist der Photolack Epon SU8 besser geeignet, da der Lack-Reflow kein Problem darstellt, aber effektiv sehr dicke Lackschichten belichtet werden müssen.

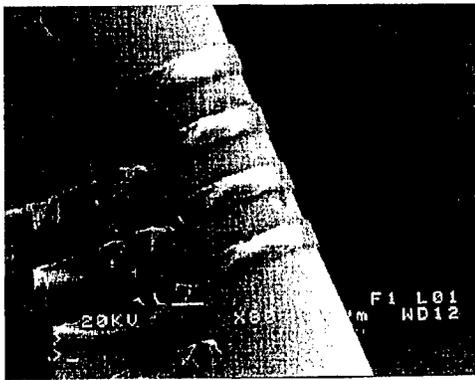


Abb. 4.12: Runder \varnothing 1,00 mm-Federstahldraht mit 100 μ m-Photolackstrukturen

Die Versuche mit runden Spulenkörpern mussten letztendlich eingestellt werden, da keine Substrate zur Verfügung standen, die ein exaktes Justieren der Lithographiemaske ermöglichen.

Prinzipiell stellen die runden Spulenkörper für Bauformen mit Durchmessern kleiner als 700 μ m eine vielversprechende Alternative zu den rechteckigen dar, da dann die maximal zu belichtende Photolackdicke weniger als 120 μ m beträgt.

An dieser Stelle muss auch die Frage nach der optimalen Kantenverrundung für die rechteckige SMT-Spulenumformung gestellt werden. Eine zu gering verrundete Kante lässt sich nicht mit ausreichender Schichtdicke lackieren. Bei einer zu stark verrundeten Kante kann der Lichtweg durch die Lackschicht an der Seitenkante gemäß Abbildung 4.11 so groß werden, dass ein Durchbelichten nicht mehr möglich ist.

Legt man einen quadratischen Spulenkörperquerschnitt zugrunde, dessen Ecken mit dem Radius r verrundet sind, dann lässt sich der Lichtweg durch den Photolack an der Seitentante nach folgender Formel berechnen:

$$d_{\text{eff}} = d \cdot \sqrt{2 \cdot \left(\frac{r}{d}\right) + 1} \quad \text{für } r > 2 \cdot d \quad (4.1)$$

Dabei ist d_{eff} der Lichtweg, r die Kantenverrundung und d die Dicke der Lackschicht. Abbildung 4.13 zeigt den Lichtweg an der Seitenkante in Abhängigkeit vom Krümmungsradius.

Für eine Kantenverrundung von 70 μ m beträgt der Lichtweg entlang der Seitentante 56 μ m. Nach den bisherigen Erfahrungen und Experimenten lässt sich eine solche Seitenkante sowohl ausreichend dick belackern wie auch problemlos belichten, weshalb für die SMT-Bauform 0402 dieser Radius für die Kantenverrundung empfohlen wird.

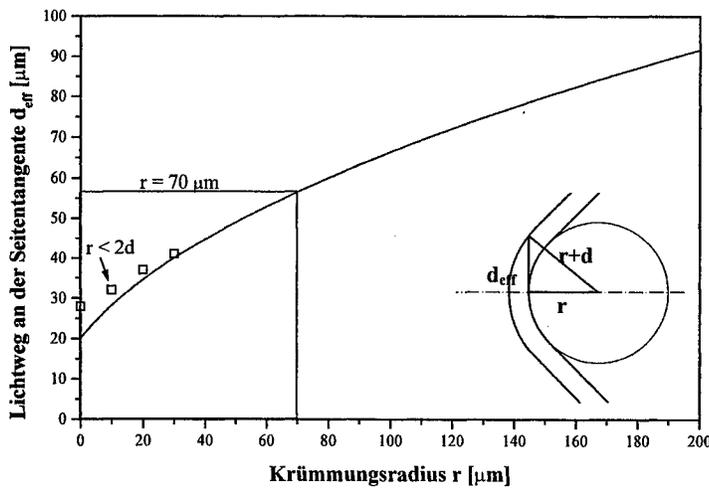


Abb. 4.13: Lichtweg durch den Photolack entlang der Seitentangente in Abhängigkeit vom Krümmungsradius

4.2.5 Photolackbelichtung auf nicht-planaren Substraten

Für die optische, maskengebundene Lithographie kommen prinzipiell Kontakt-, Proximity- und Projektionsverfahren für die Photolackbelichtung in Frage (Abbildung 4.14), [96H1], [88M1]. Der grundsätzliche Unterschied bei der Photolackbelichtung auf nicht-planaren Substraten zur Planartechnik besteht darin, dass die belackten Flächen unterschiedliche Abstände zur Lithographiemaske aufweisen, weshalb eine ganzflächige Kontaktbelichtung nicht möglich ist. Für die durch Laserablation hergestellten Spulenkörper variiert der Abstand zwischen Photolack und Lithographiemaske, im folgenden als Proximityabstand bezeichnet, zwischen 0 µm und 365 µm. Für die SMT-Bauform 0402 reduziert sich der maximale Proximityabstand gemäß Abbildung 3.6 (Seite 40) auf (254 ± 9) µm. Für die optische Abbildung der Windungsstrukturen wird somit idealerweise ein Tiefenschärfebereich Δf von knapp 400 µm benötigt. Der Tiefenschärfebereich beim Projektionsverfahren ist durch die Wellenlänge λ und die numerische Apertur NA^1 des Objektivs gegeben [85S1]:

$$\Delta f = \pm \frac{\lambda}{2 \cdot NA^2} \tag{4.2}$$

¹ Numerische Apertur $NA = n \cdot \sin \alpha$, wobei α der halbe Öffnungswinkel des Objektivs und n die Brechzahl des umgebenden Mediums ist [00E1].

Für Projektionsverfahren liegt der Tiefenschärfebereich in der Größenordnung $\pm 1 \mu\text{m}$, weshalb für die Belichtung von nicht-planaren Substraten mit stark variierendem Abstand zur Maske nur das Proximityverfahren in Betracht kommt.

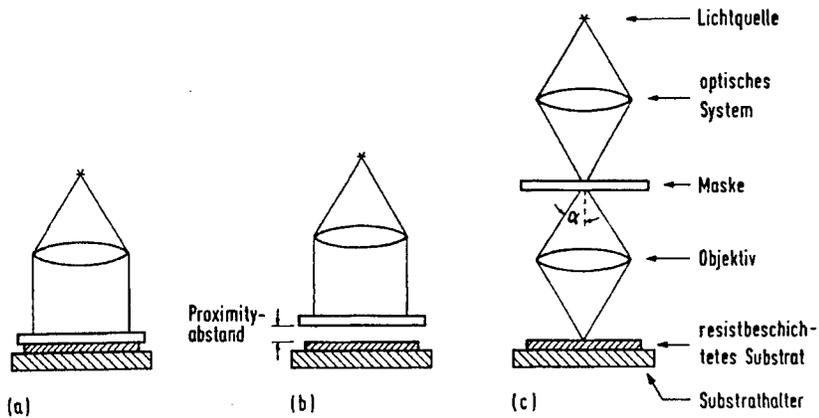


Abb. 4.14: Belichtungsverfahren der Photolithographie:
a) Kontaktbelichtung; b) Proximitybelichtung; c) Projektionsbelichtung

Beugungseffekte

Das nahezu parallele Licht der Belichtungsmaschine wird an den Strukturen der Chrom-Quarzglasmaske in die Schattenbereiche gebeugt, weshalb sich nicht beliebig kleine Strukturen abbilden lassen. Dabei wird die Lage des ersten Beugungsmaximums auf dem Substrat durch die Wellenlänge, die Strukturgröße und den Abstand zwischen Maske und Substrat bestimmt [94B1]. Die theoretische Auflösungsgrenze b_{\min} für eine Schattenmaske aus 'lines and spaces' mit der gleichen Breite b ist gegeben durch [95L1], [96H2]:

$$b_{\min} = \frac{3}{2} \cdot \sqrt{\lambda \cdot \left(x + \frac{1}{2} \cdot d_{\text{Resist}}\right)} \quad (4.3)$$

Dabei ist λ die Wellenlänge, x der Proximityabstand und d_{Resist} die Dicke der Photolackschicht. Abbildung 4.15 zeigt die minimale Strukturgröße gemäß Gleichung (4.3) in Abhängigkeit vom Proximityabstand für eine Wellenlänge von 365 nm (Hg-i-Linie) und eine Resistdicke von 20 μm . Für die SMT-Bauform 0402 entsprechend Abbildung 3.6 beträgt die minimale Strukturbreite nach dieser Abschätzung 15 μm und ist damit etwa genauso groß wie die minimale Schnittbreite des Laserstrahls beim Fertigen von SMT-Spulen mittels Laserwendeln. Somit lassen sich mit der Lithographie dieselben Windungsdichten wie beim Laserwendeln realisieren. Für die nächst kleinere SMT-Bauform 0201 liegt die minimale Strukturbreite bei 10 μm , weshalb hier bereits die Photolithographie dem Laserwendeln in der Strukturgröße überlegen ist.

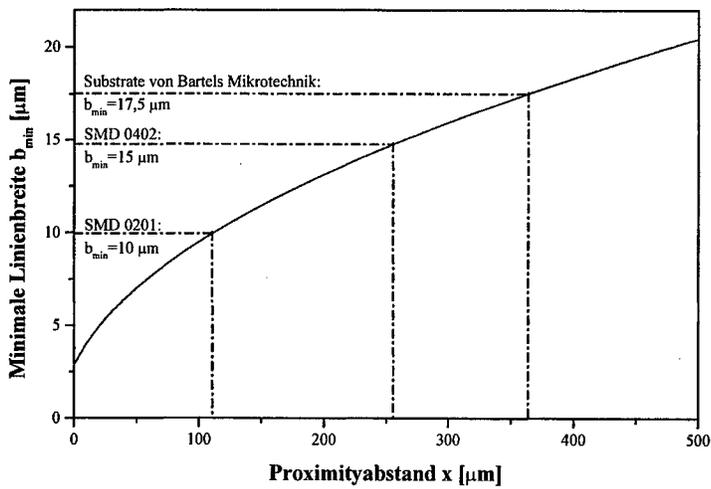


Abb. 4.15: Minimale Linienbreite bei einer Wellenlänge von 365 nm und einer Lackdicke von 20 μm

Experimentelle Einrichtung

Der Photolack Eagle ist im Wellenlängenbereich von 320 nm bis 400 nm sensitiv für die photoinduzierte Polymerisation, wobei das Sensitivitätsmaximum mit der i-Linie der Quecksilberdampfampe ($\lambda = 365 \text{ nm}$) zusammenfällt.

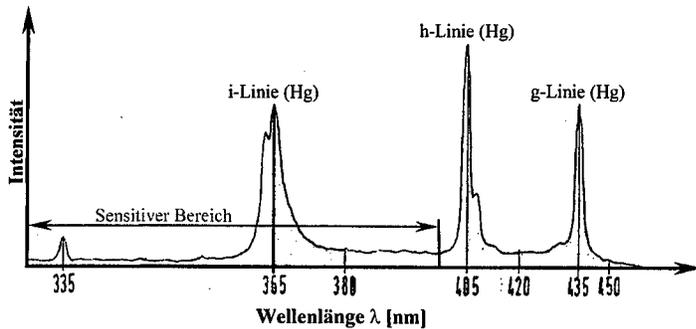


Abb. 4.16: Spektrum einer Quecksilberlampe mit UV 400 Filter (Fa. Karl Süss)

Für die Belichtungsexperimente stand eine Belichtungsmaschine vom Typ MA 4 der Fa. Karl Süss zur Verfügung, die mit einer beugungsreduzierenden D-Optik und dem Standard UV 400 Lichtfilter ausgestattet ist. Der UV 400 Filter nützt das gesamte Spektrum der Quecksilberlampe unterhalb 450 nm. Wie Abbildung 4.16 zeigt, trägt somit ausschließlich die i-Linie zur photoinduzierten Polymerisation bei. Deshalb kann von einer quasi-monochromatischen Lichtquelle mit einer Wellenlänge von 365 nm ausgegangen werden. Abbildung 4.17 zeigt den Aufbau des optischen Systems der Belichtungsmaschine. Im Brennpunkt des elliptischen Spiegels (2) sitzt die 350 W Quecksilberlampe (1). Der Kaltlichtspiegel (3) reflektiert den UV 400-Spektralbereich des Lichts in das Fliegenauge (4), das wiederum das Lichtbündel gleichmäßig auf die Kondensorlinse (5) abbildet. Die Position (6) der 'optischen Bank' ist für zusätzliche Filter vorgesehen, welche allerdings im Rahmen der Experimente nicht genutzt wurden. Die Linsenplatten (7) teilen den Lichtstrahl in insgesamt sieben teilkohärente Lichtstrahlen, was für die Reduzierung der Beugungseffekte notwendig ist. Der Umlenkspiegel (8) richtet die Lichtstrahlen auf die Frontlinse (9), unterhalb derer sich die Maske und das Substrat befinden.

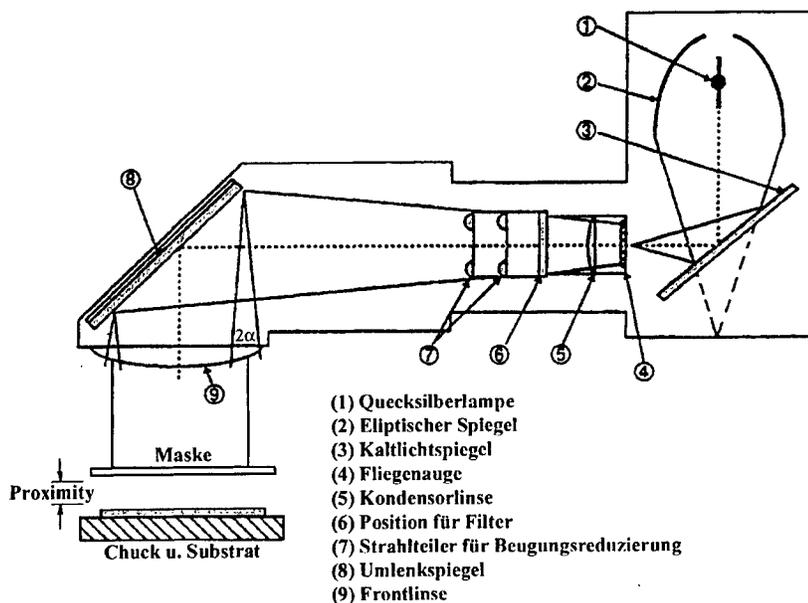


Abb. 4.17: Anordnung der optischen Komponenten in der MA 4

Abbildung 4.18 erklärt das Prinzip der beugungsreduzierenden Optik: Trifft paralleles Licht auf einen Spalt in der Lithographiemaske, so entspricht aufgrund der Beugung die Intensitätsverteilung am Substrat im Proximityabstand x nicht einer Kastenfunktion, sondern dem unter 4.18.A skizzierten Verlauf, welcher das nullte und erste Beugungsmaximum zeigt. Zerlegt man das Licht der Quecksilberlampe in zwei Teilstrahlen, so sind diese partiell kohärent und interferenzfähig am Substrat. Abbildung 4.18.B zeigt, wie sich mit Hilfe der gesplitteten Teilstrahlen, die unter einem kleinen

Winkel $\pm\alpha$ auf die Maske einfallen, das erste Beugungsmaximum durch destruktive Interferenz nahezu eliminieren lässt. Abbildung 4.18.C zeigt das Ergebnis der Superposition mehrerer teilkohärenter Lichtstrahlen im Vergleich zum konventionellen, parallelen Licht: Die Intensitätsverteilung ist wesentlich besser einer Kastenfunktion angepasst, wodurch sowohl die Auflösung wie auch die Kantensteilheit verbessert werden.

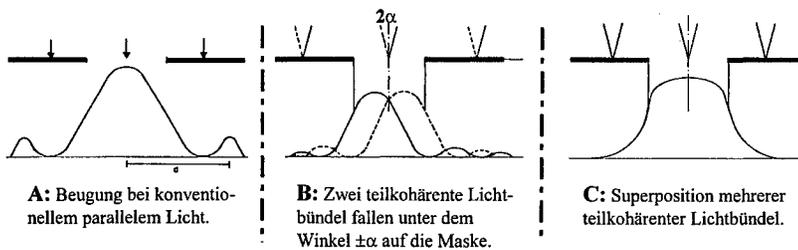


Abb. 4.18: Prinzip der beugungsreduzierenden D-Optik der Fa. Karl Süss

Der ideale Einfallswinkel α für eine Richtung auf der Maske kann aus der Wellenlänge, dem Proximityabstand und der Spaltbreite berechnet werden. Um die Beugung für alle Richtungen, Proximityabstände und Spaltbreiten zu reduzieren, müssen mehrere Teilstrahlen verwendet und ein Kompromiss eingegangen werden. Die Fa. Karl Süss bietet verschiedene beugungsreduzierende Optiken für unterschiedliche Anwendungen an. Tabelle 4.9 zeigt den Kollimationswinkel α_{max} und die Anzahl der verwendeten teilkohärenten Lichtbündel für die D-Optik, die LEGO¹-Optik und die MA 200-Optik.

Optik	Kollimationswinkel α_{max}	Anzahl der teilkohärenten Lichtstrahlen
D	3°	7
LEGO	1,5°	64
MA 200	1,5°	12

Tab. 4.9: Beugungsreduzierende Optiken der Fa. Karl Süss

Für Proximityabstände größer 100 μm und Lackdicken größer 20 μm ist die LEGO-Optik bei Auflösung und Kantensteilheit der D-Optik deutlich überlegen. Für Proximityabstände kleiner 60 μm und Lackdicken kleiner 10 μm ist die D-Optik besser geeignet [97C1]. Insgesamt empfiehlt sich für die hier präsentierte Aufgabenstellung die LEGO-Optik, die aber nicht zur Verfügung stand. Abbildung 4.19 zeigt einen Vergleich des Auflösungsvermögens der beiden Optiken, interpoliert aus Messdaten der Fa. Karl Süss für eine Lackdicke von 20 μm . Tabelle 4.10 gibt die entsprechenden minimalen Strukturbreiten an, die man mit der D- und der LEGO-Optik auf den unterschiedlichen Bauformen erreichen kann.

¹ LEGO = Large Exposure Gap Optic

Bauform	Proximityabstand x [μm]	Theoretisch b_{min} [μm]	Auflösung D-Optik [μm]	Auflösung LEGO-Optik [μm]
SMT 0201	110	10	14	14
SMT 0402	254	15	25	18
Bartels Mikrotech.	365	17,5	33	22

Tab. 4.10: Minimale Strukturgröße für D- und LEGO-Optik auf den verschiedenen Bauformen

Die minimale Strukturgröße, die man mit der D-Optik auf den Spulenkörpern der Fa. Bartels Mikrotechnik erreichen kann, beträgt etwa 33 μm . Um die qualitativen Aspekte des Experiments nicht an technischen Grenzen der Versuchsanordnung scheitern zu lassen, wurde deshalb im Rahmen der Experimente versucht, Spulen mit einer Windungsbreite von 40 μm bzw. 50 μm zu realisieren.

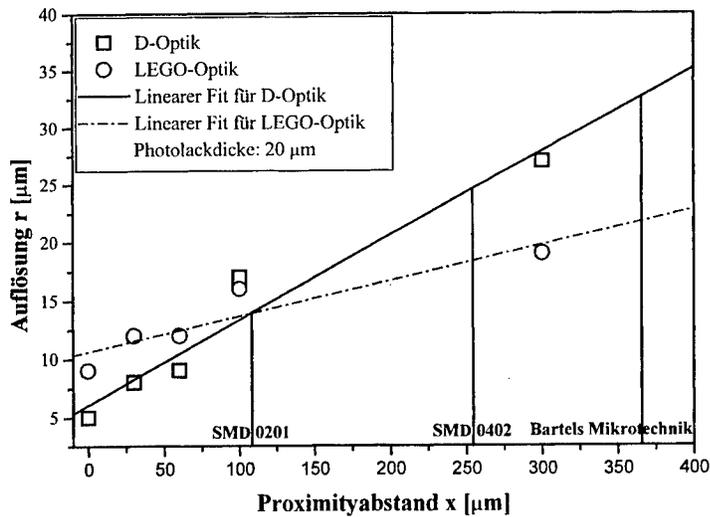


Abb. 4.19: Auflösungsvermögen der D- und der LEGO-Optik für einen 20 μm dicken Photolack

Da die teilkohärenten Lichtstrahlen nicht parallel, sondern unter einem kleinen Winkel $0 < \alpha < 3^\circ$ auf die Lithographiemaske einfallen, divergiert das Licht nach der Lithographiemaske in die Dunkelfeldbereiche. Die Lichtstrahldivergenz führt somit zu einer Verbreiterung Δb der Photolackstrukturen, die vom Proximityabstand x und vom effektiven Divergenzwinkel α_{eff} abhängt:

$$\Delta b = b' - b = 2 \cdot x \cdot \tan \alpha_{\text{eff}} \quad (4.4)$$

Abbildung 4.20 zeigt die Verbreiterung von 50 μm breiten Photolackstrukturen in Abhängigkeit vom Proximityabstand auf den Seitenflächen eines Spulenkörpers der Fa. Bartels Mikrotechnik. An der Spulenseitenkante im Proximityabstand von 365 μm beträgt die Breite des Photolacksteiges bereits etwa 70 μm , woraus sich ein Δb von 20 μm und ein α_{eff} von 1,6° ergibt.

Die Abbildung 4.20 zeigt auch, dass sich die Verbreiterung der Photolackstege erst für Proximityabstände größer 170 μm deutlich bemerkbar macht. Der Effekt lässt sich also bei näherer Betrachtung nicht linear entsprechend Gleichung (4.4) beschreiben. Die Nichtlinearität liegt darin begründet, dass die beugungsreduzierende D-Optik für kleinere Proximityabstände optimiert ist und hier ein gutes Ergebnis auf dem Substrat liefert. Für größere Proximityabstände werden die Bedingungen für die beugungsreduzierende Superposition der teilkohärenten Lichtstrahlen nicht mehr optimal erfüllt, weshalb sich hier die Strahlaufteilung über die Lichtstrahldivergenz negativ auf die Strukturbreite auswirkt.

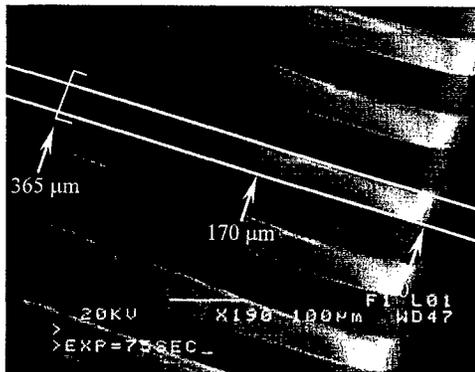


Abb. 4.20: Strukturverbreiterung aufgrund der Lichtstrahldivergenz

Die Lichtstrahldivergenz lässt sich korrigieren, indem für einen festen Proximityabstand s der Spalt der Breite b_0 durch einen Spalt der Breite $b = b_0 - \gamma(s)$ ersetzt wird. Die Korrektur ist aber nur möglich, solange die Spaltbreite b größer als die minimale Strukturgröße b_{min} bleibt, welche durch die Beugung bzw. die Auflösung der Optik bestimmt wird. Variiert der Proximityabstand, so muss die Spaltbreite an jedem Ort gemäß der nachfolgenden Gleichung korrigiert werden:

$$b(y) = b_0 - 2 \cdot s(y) \cdot \tan \alpha_{\text{eff}} > b_{\text{min}} \quad (4.5)$$

Dabei ist entsprechend Abbildung 4.21 y die Ortskoordinate senkrecht zur Spulenkörperhauptachse und parallel zur Lithographiemaske und $s(y)$ der Proximityabstand.

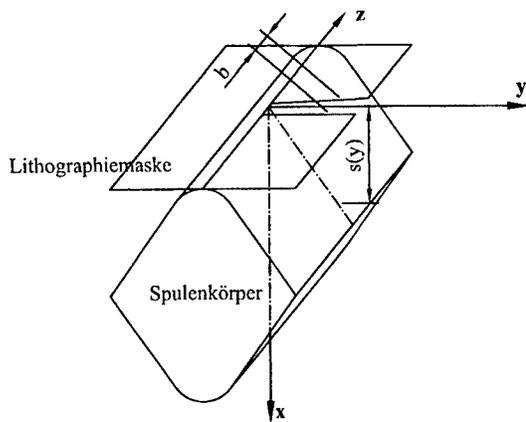


Abb. 4.21: Korrektur der Lichtstrahldivergenz bei variierendem Proximityabstand

Da die Abmessungen der bei Bartels Mikrotechnik hergestellten Spulenkörper variieren und daher die Proximityabstandsfunktion $s(y)$ stark streut, konnte die Lichtstrahldivergenz nur annähernd korrigiert werden. Ein Spalt der Breite b in der Photolithographiemaske wurde durch ein Trapez mit den Seitenlängen b und $b-\gamma$ ersetzt (Abbildung 4.22). Der Wert $\kappa := 1 - \gamma/b$ wird im Folgenden als Divergenzkomensation bezeichnet. Die besten Ergebnisse wurden mit einem κ von 0,75 erzielt, wenn gleichzeitig die Lichtstrahlteiler der D-Optik (Abbildung 4.17; Position 7) nicht verwendet wurden. Ohne die beugungsreduzierenden Lichtstrahlteiler lässt sich der Divergenzwinkel α_{eff} der Optik in Zentrumsnähe der Kondensorlinse (Abbildung 4.17; Position 9) auf etwa 1° reduzieren. Außerhalb des Zentrumsbereiches waren die Ergebnisse drastisch schlechter, weshalb diese Labormethode für die Massenfertigung nicht verwendet werden kann. Hier ist dann in jedem Fall die LEGO-Optik zu empfehlen.

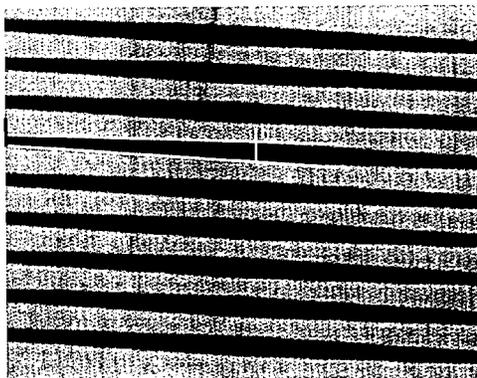


Abb. 4.22: Windungsstrukturen in der Lithographiemaske (die hellen Flächen sind aus Chrom)

Abbildung 4.23 zeigt, wie sich mit Hilfe der Kompensationsstrukturen Photolackstege mit einem fast homogenen Querschnitt auf den Spulenkörpern der Fa. Bartels Mikrotechnik erzeugen lassen.

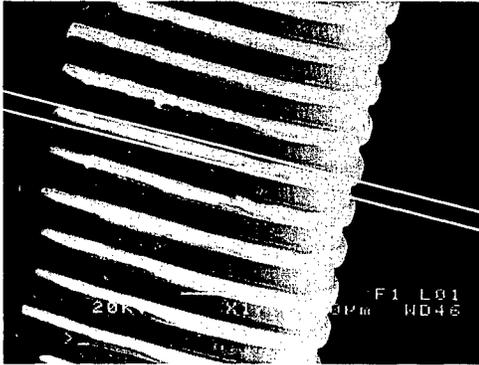


Abb. 4.23: Photolackstege hergestellt mit einer Divergenzkompensation von $\kappa = 0,75$ und ohne die Strahlteiler der beugungsreduzierenden D-Optik

An dieser Stelle soll noch darauf hingewiesen werden, dass die Divergenzkompensation die Lichtintensität in dem Maße reduziert, mit dem die Spaltbreite für größere Proximityabstände reduziert wird. Bei Abbildung 4.23 wurden die Seitenkanten im Vergleich zur Oberkante mit nur noch etwa 75 % der Lichtintensität belichtet. Dies ist insofern problematisch, da an der Seitenkante effektiv eine dickere Lackschicht belichtet werden muss. Aus diesem Grund arbeitet man in einem Prozessfenster, in dem die Photolackstege im größeren Proximity-Abstand unterbelichtet und an der Spulenoberkante überbelichtet sind. Theoretisch ist eine Intensitätskorrektur denkbar, aber sehr aufwändig und nicht erforderlich, da sich der Photolack unkritisch verhält und auch keine sehr hohen Ansprüche an die Kantensteilheit gestellt werden müssen.

Entwicklung der Photolackstrukturen

Die Entwicklung des belichteten Photolacks Eagle erfolgt (ohne Postexposure-Bake¹) in dem von der Fa. Shipley angebotenen Entwicklerbad 'Eagle 2005 Developer' bei einer Temperatur von $(40 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Die Ätzrate des Entwicklers beträgt dabei etwa $10 \mu\text{m}/\text{min}$. Da die Photolackhaftung auf dem Substrat durch den Softbake im Vakuum deutlich geringer ist als bei einem Prebake bei $110 ^\circ\text{C}$, sind die freistehenden Photolackstege sehr empfindlich gegen mechanische Belastungen durch die Entwicklerflüssigkeit. Aus diesem Grund müssen Substratbewegungen sowohl im Entwicklerbad als auch beim anschließenden Entwicklungsstopp im DI-Wasser sehr sanft und vorsichtig erfolgen.

Um eine Kontraktion des Photolacks und damit ein Aufreißen der Photolackstege an der Seitenkante zu vermeiden, werden die Substrate nach dem Entwicklungsstopp nicht im Umluftofen getrocknet, sondern sofort aufgalvanisiert. Teilweise wurden die Substrate vor

¹ Aushärten des Lacks nach dem Belichten

der Kupferabscheidung mit dem 'Acid Cleaner 1118' von der Fa. Shipley in einer Petrischale für 3 min bis 5 min gereinigt. Eine signifikante Verbesserung der Kupferqualität wurde dadurch aber nicht beobachtet, weshalb man auf den Reinigungsschritt verzichten kann.

Abbildung 4.24 zeigt die so erzeugten Photolackstege auf einem Spulenkörper der Fa. Bartels Mikrotechnik. Aufgrund von Justier- und Positionsungenauigkeiten sind die Photolackstege der Substratvorder- und Rückseite um etwa $20\ \mu\text{m}$ gegeneinander versetzt.

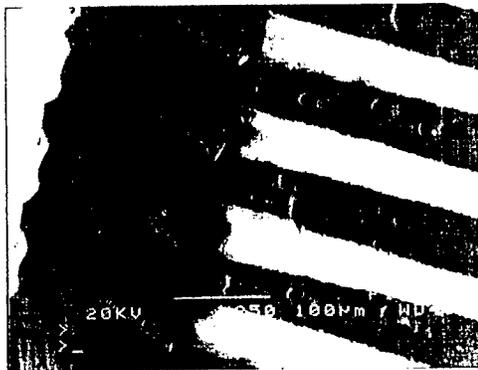


Abb. 4.24: Photolackstege auf einem Spulenkörper der Fa. Bartels Mikrotechnik

4.3 Excimer Laser-Lithographie

Im Abschnitt 4.2.5 wurde dargestellt, wie die Lichtstrahldivergenz das Auflösungsvermögen in großen Abständen zur Lithographiemaske bei der Belichtung von nicht-planaren Substraten im Proximityverfahren begrenzt. Das Auflösungsvermögen der D-Optik beträgt für $365\ \mu\text{m}$ Proximityabstand zur Maske $33\ \mu\text{m}$, obwohl das durch die Beugung begrenzte Auflösungsvermögen bei etwa $12\ \mu\text{m}$ liegt. Bei Verwendung einer divergenzfreien Lichtquelle kann die minimale Strukturgröße nochmals erheblich reduziert werden.

Das Licht eines Lasers ist nahezu divergenzfrei: Die typische Lichtstrahldivergenz liegt in der Größenordnung von $1\ \text{mrad}$ bis $3\ \text{mrad}$. Bei einer Belichtungsmaschine beträgt die Lichtstrahldivergenz 1° bis 3° und ist somit etwa um den Faktor 20 größer.

Im Folgenden wird die Eignung eines Excimer Lasers als Lichtquelle für die Lithographie auf nicht-planaren Substraten untersucht.

4.3.1 Experimenteller Aufbau

Für die Belichtungsexperimente wurde von der Fa. TUI Laser ein Xenonfluorid-Excimer Laser vom Typ ExciStar S-500 (Laserklasse IV) zur Verfügung gestellt. Der Laser arbeitet bei einer Wellenlänge von $351\ \text{nm}$. Diese Wellenlänge liegt im zentralen Sensitivitätsbereich der beiden Photolacke Epon SU8 und Eagle 2100. Die maximale Pulsenergie des

Lasers ist mit 8 mJ relativ gering. Für die Belichtungsexperimente ist dies notwendig, da bei höheren Pulsenergien die chemische Struktur des Photolacks aufgrund der erzeugten Wärme zerstört werden kann [88E1]. Für die Experimente wurde die Pulsenergie deshalb sogar auf 5 mJ herabgesetzt. Die Pulsdauer wird mit 10 ns (FWHM) angegeben. Die Pulsfrequenz kann beliebig zwischen 1 Hz und 500 Hz variiert werden.

Der Hersteller gibt für die lateralen Strahldimensionen einen Wert von $3 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ an, wobei er garantiert, dass die Divergenz auf der schmalen Pulsseite kleiner 1 mrad und auf der langen Pulsseite kleiner 2 mrad ist.

Abbildung 4.25 zeigt den Aufbau für die Lithographieexperimente: Das Substrat wird auf dem Teflon-Chuck mit einer Vakuumpumpe festgesaugt und kann in x- und y-Richtung um $\pm 75 \text{ mm}$ verfahren werden. Die Lithographiemaske kann lediglich in z-Richtung verfahren werden, wobei sich der Proximityabstand mit einer Mikrometerschraube zwischen 0 mm und 25 mm auf $\pm 10 \mu\text{m}$ genau einstellen lässt. Der gepulste Lichtstrahl tritt parallel zur optischen Bank aus dem Laser und wird mit einem 90° -Umlenkspiegel senkrecht auf die Lithographiemaske und das Substrat gerichtet. Die korrekten Winkel des Umlenkspiegels und der Lithographiemaske zum Strahl und zum Substrat können an jeweils drei Schrauben eingestellt werden. Für die Justierung diente ein Helium-Neon-Laser ($\lambda = 633 \text{ nm}$, Laserklasse I), wobei der Aufbau so eingestellt wurde, dass der am Chuck und der Maske reflektierte Laserstrahl in sich selbst zurück fällt.

Nachteil an diesem einfachen Aufbau ist, dass sich das Substrat nur grob zur Lithographiemaske justieren lässt. Es gibt weder ein Justiermarkenmikroskop noch kann der Chuck relativ zur Maske gedreht werden. Auch die Positionsschrauben für den Chuck sind relativ grob, weshalb der Aufbau nur für Voruntersuchungen, nicht aber für die Herstellung der MST-Spulen geeignet ist.

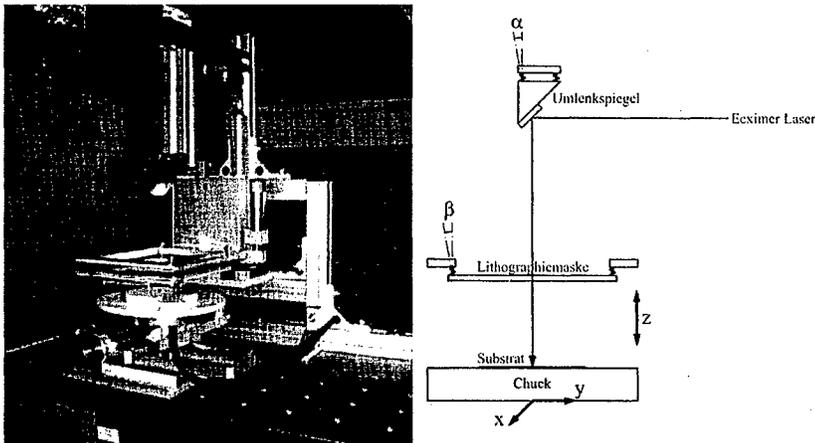


Abb. 4.25: Experimenteller Aufbau für die Lithographieexperimente mit dem Excimer Laser

4.3.2 Lithographie mit ultradickem Photolack

Die ersten Belichtungen wurden mit dem Photolack Epon SU8-50 auf planaren Substraten durchgeführt. Da sich die Divergenz der Lichtquelle auch bei der Belichtung von ultradicken Photolacken mit Schichtdicken von 100 μm und mehr störend auswirkt, wurde versucht, möglichst dicke Lackschichten aufzubauen. Deshalb wurde der Lack nicht mit dem Spinner, sondern mit einem Pinsel auf eine Fläche von 20 mm \times 20 mm aufgetragen und anschließend 45 Minuten im Umluftofen bei 100 $^{\circ}\text{C}$ gebacken. Die Dicke der Resistsschichten betrug im Zentrumsbereich etwa 150 μm und fiel zum Rand hin auf etwa 80 μm ab. Die Fa. Microresist Technology gibt für eine Wellenlänge von 365 nm und eine Resistdicke von 50 μm bis 70 μm eine Belichtungsenergie von 300 mJ/cm^2 an [00J1]. Für die Belichtung einer 150 μm dicken Schicht mit einer Energie von 25 mJ/cm^2 pro Laserpuls werden somit etwa 30 Laserpulse benötigt. Die Anzahl der Laserpulse für die Belichtung wurde zwischen 20 Pulsen und 100 Pulsen in Schritten von 5 Pulsen variiert. Die besten Ergebnisse wurden mit 60 Laserpulsen erzielt. Nach der Belichtung wurden die Lackschichten für 25 Minuten im Umluftofen bei 110 $^{\circ}\text{C}$ gebacken und anschließend 5 Minuten im Entwicklerbad entwickelt.

Abbildung 4.26 zeigt das Ergebnis der Lithographie mit 20 μm bzw. 30 μm -Strukturen 'lines & spaces'. Die Seitenflanken des Photolacks sind bei einem Aspektverhältnis von fünf nahezu senkrecht. Ein größeres Aspektverhältnis konnte nicht realisiert werden, da sich dann der unbelichtete Photolack im Entwicklerbad nicht mehr vollständig aus den Strukturen entfernen ließ, obwohl mit dem Photolack SU8 auch schon Aspektverhältnisse von 18 erreicht wurden [97D1], [96L1]. Dies liegt aber weniger an der verwendeten Lichtquelle, sondern vielmehr daran, dass die Zeiten und Temperaturen für den Soft- und Postexposure Bake nicht optimal waren.

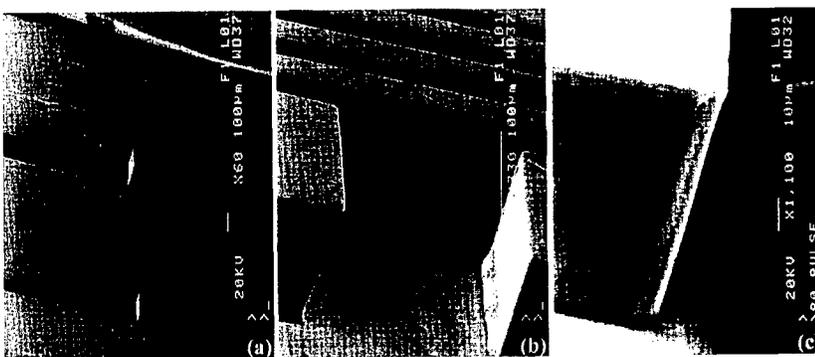


Abb. 4.26: Mit dem Excimer Laser erzeugte Strukturen: 'lines & spaces' in Epon SU8-50
 a) Resistdicke variiert zwischen 150 μm im Zentrum und 80 μm am Rand
 b) Aspektverhältnis von bis zu 5 konnte realisiert werden
 c) Senkrechte Seitenflanken demonstrieren die Leistungsfähigkeit des Lasers

Im Gegensatz zu den Belichtungsversuchen auf der MA 4 mit der D-Optik konnte bei allen Experimenten mit dem Laser eine periodische Wellenstruktur in der Lackseitenflanke der 'lines & spaces', nicht aber bei anderen Strukturen beobachtet werden. Abbildung 4.27 zeigt diese Wellenstruktur: Die Periode beträgt knapp $10\ \mu\text{m}$ bei einer maximalen Amplitude von $1\ \mu\text{m}$.

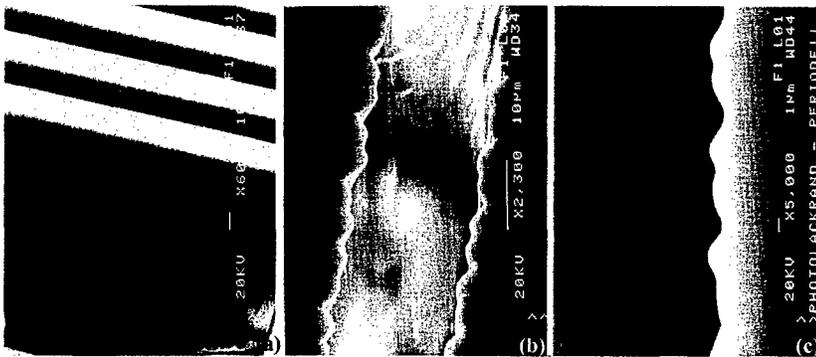


Abb. 4.27: Periodische Wellenstruktur in der Seitenflanke der Photolackstege:
 a) Blick auf die Seitenflanke
 b) Blick in den Graben zwischen zwei Photolackstege
 c) Detailaufnahme der periodischen Wellenstruktur

Im Vergleich zur D-Optik ist das Laserlicht monochromatisch mit hoher räumlicher Kohärenz, weshalb Beugungs- und Interferenzeffekte in klaren Strukturen sichtbar werden. Die genaue Ursache für die periodische Struktur in der Seitenflanke ist allerdings bis jetzt nicht geklärt.

4.3.3 Lithographie auf nicht-planaren Substraten

Als Vorversuch für die Belichtung der belackten Spulenkörper der Fa. Bartels Mikrotechnik wurde ein planares, mit dem Photolack Eagle beschichtetes Substrat im Proximityabstand von $(730 \pm 50)\ \mu\text{m}$ belichtet. Als Distanzhalter zwischen Substrat und Maske diente derselbe Polyimidfolientyp, der für die Substratherstellung verwendet wurde. Somit war der Proximityabstand doppelt so groß wie der maximale Proximityabstand bei der Belichtung der Spulenkörper. Abbildung 4.28 zeigt das Ergebnis dieser Lithographie: Die $30\ \mu\text{m}$ -Strukturen können im Gegensatz zur D-Optik gut aufgelöst werden. Allerdings fällt die Kantensteilheit drastisch schlechter aus als bei einer Kontaktbelichtung. An den kurzen Seiten des Rechtecks in der Lithographiemaske, durch welches das Laserlicht fällt, sind deutlich Beugungseffekte zu erkennen. Das Laserlicht wird hier besonders stark in die Dunkelfeldbereiche der Maske gebeugt, weshalb die Kanten des nicht belichteten Rechtecks zu einer runden Form verschmieren. Die erzeugten Photolackstrukturen sind dennoch gut genug, um die Spulendwindungen mit einer höheren Qualität als beim Laserwindeln herzustellen.

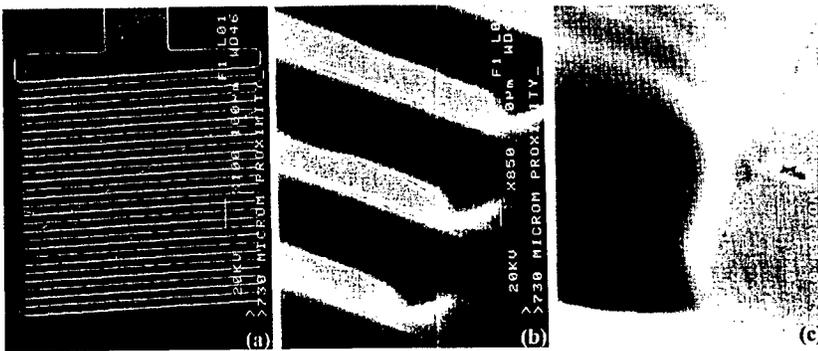


Abb. 4.28: Die abgebildeten Windungsstrukturen mit einer Strukturgröße von $30\ \mu\text{m}$ wurden mit einem Proximityabstand von $730\ \mu\text{m}$ belichtet:
 a) Blick auf den gesamten Windungsbereich
 b) Beugungseffekt an den kurzen Enden des Rechtecks
 c) Die Kantensteilheit wird für große Proximityabstände deutlich schlechter

Nach diesem positiven Lithographieergebnis wurde versucht, Photolackstege mit einer Breite von $60, 50, 40, 30, 20$ und $10\ \mu\text{m}$ auf die Spulenkörper der Fa. Bartels Mikrotechnik abzubilden. Alle bis auf die $10\ \mu\text{m}$ breiten Strukturen konnten mit konstantem Querschnitt auf den Spulenkörpern erzeugt werden, obwohl eine Lithographiemaske ohne Kompensationsstrukturen verwendet wurde. Abbildung 4.29 zeigt die Aufnahmen von $20\ \mu\text{m}$ breiten Photolackstegen. Die Breite dieser Photolackstege liegt bereits nahe an der theoretischen Strukturbreite von $17\ \mu\text{m}$, die sich aus der Formel 4.3 (Seite 68) ergibt. Dies demonstriert, dass sich mit der Photolithographietechnik mindestens die selben Strukturgrößen wie mit dem Laserwendeln herstellen lassen.

Der Laserstrahl kann auf eine Fläche von $10\ \text{mm} \times 10\ \text{mm}$ aufgeweitet werden. So lässt sich mit einer Pulsfrequenz von $200\ \text{Hz}$ eine Elementarzelle mit 32 Spulenkörpern in $0,5\ \text{sec}$ belichten. Die Gesamtbelichtungszeit mit dem Laser für ein Bronzestreifensubstrat mit 2048 Spulenkörpern ist dann etwa genauso groß wie mit einer Standardbelichtungsmaschine. Deshalb ist die Belichtung des Substrats mit dem Laser im Step and Repeat-Verfahren im Vergleich zu einer großflächigen Belichtungsmaschine nicht wesentlich unwirtschaftlicher.

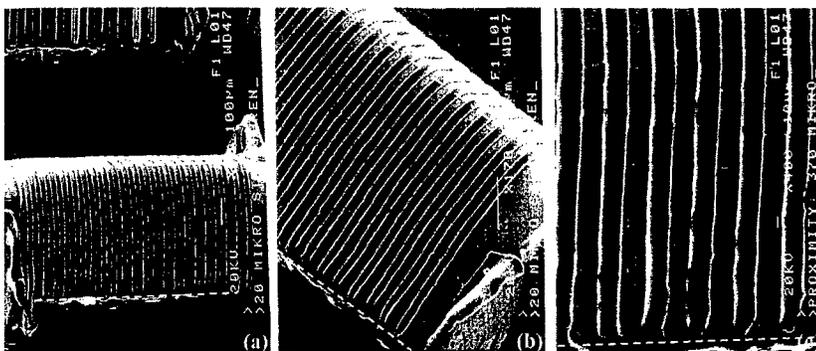


Abb. 4.29: Photolackstege mit einer Breite von 20 μm auf Spulenkörpern der Fa. Bartels Mikro-technik. Die gestrichelten Linien markieren die Kanten des Spulenkörpers.

4.4 Abformung der Leiterbahnen

Die Abformung der Leiterbahnen beinhaltet das Auffüllen der nicht mit Photolack bedeckten Flächen mit Kupfer, das Ablösen der Photolackstrukturen sowie das Rückätzen der Startmetallisierung.

4.4.1 Galvanische Kupferabscheidung

Für die Galvanoabformung der Leiterbahnen wurde der saure, auf dem Kupfersalz CuSO_4 basierende [00M2] und für industrielle Anwendungen konzipierte Standardbadansatz 'Kupfer 837' der Fa. Degussa Galvanotechnik verwendet. Dem Badansatz sind sowohl Benetzungsmittel wie auch Glanzbildner beigemischt, weshalb sich aus diesem Elektrolyten hochglänzende und äußerst porenarme Kupferschichten bis in den niederen Stromdichtebe- reich abscheiden lassen. Darüber hinaus zeichnet sich der Elektrolyt durch eine einfache Wartung und einen geringen Verbrauch der glanzbildenden Zusätze aus.

Experimenteller Aufbau

Der experimentelle Aufbau für die Kupferabscheidung war in etwa derselbe wie für die elektrophoretische Lackierung (Abbildung 4.30): Das kathodisch kontaktierte Substrat befindet sich in der Mitte eines Aquariumglases¹, in dem sich 2,5 Liter des Elektrolyten befinden. Um eine möglichst homogene Abscheidung zu erreichen, wird mit zwei symmetrischen Anoden im Abstand von 10 cm zum Substrat gearbeitet, wobei die vom Elektrolyt benetzte Fläche 5 cm \times 10 cm beträgt. Zusätzlich wird an neun verschiedenen Stellen am

¹ Höhe \times Länge \times Breite = 18 \times 18 \times 13 cm³

Boden des Aquariumglases kontinuierlich Stickstoff eingeblasen, um einen ausreichenden Ionentransport und Ionenkonzentrationsausgleich besonders in den kleinen Mikrostrukturen zu gewährleisten.

Auf eine kontinuierliche Mikrofiltration des Elektrolyten wurde verzichtet, der Elektrolyt wurde aber nach jeweils 5 Amperestunden vollständig filtriert.

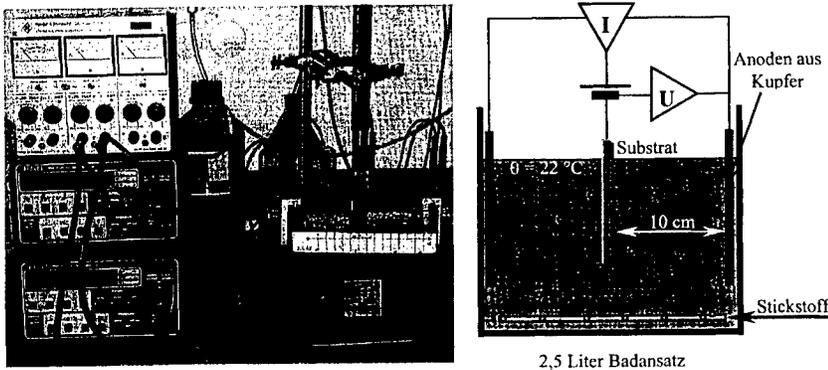


Abb. 4.30: Experimenteller Aufbau zur Galvanoabformung

Kupferabscheidung

Der Hersteller empfiehlt für die Kupferabscheidung eine Elektrolyttemperatur von 22 °C und eine Stromdichte von 50 mA/cm², für die er eine Abscheiderate von 1,1 µm/min angibt [94D1]. Für die Expositionszeit t des Substrats gilt die folgende Näherungsformel:

$$t[\text{min}] \approx 47 \cdot \frac{F[\text{cm}^2] \cdot d[\mu\text{m}]}{I[\text{mA}]} \quad (4.6)$$

Dabei ist F die zu beschichtende Fläche, d die gewünschte Schichtdicke und I der Abscheidestrom. Bei den Experimenten wurden die besten Ergebnisse für die Kupferabscheidung in den Mikrostrukturen mit geringeren Stromdichten als vom Hersteller empfohlen erzielt. Abbildung 4.31 gibt den typischen Verlauf für die Stromdichte und die Spannung während der Abscheidung wieder. Die Abscheidung wurde mit sehr geringen Stromdichten von etwa 1 bis 2 mA/cm² begonnen. Innerhalb von 5 bis 10 min wurde dann die Stromdichte in mehreren Stufen auf den endgültigen Wert von 20 mA/cm² gesteigert.

Die über die Zeit und die Substratfläche gemittelte Abscheiderate beträgt bei einer Stromdichte von 20 mA/cm² etwa 0,4 µm/min. Die Abscheiderate auf den einzelnen, nicht mit Photolack bedeckten Teilflächen hängt dabei stark von der Strukturgröße ab. Im Bereich der 50 µm bzw. 40 µm großen Mikrostrukturen zwischen den Photolackstegen war die Abscheiderate um den Faktor 3 geringer als auf den restlichen Substratflächen. Auf einem

einzelnen Spulenkörper kommen nur zwei unterschiedliche Strukturgrößen vor: Einmal die Stirnflächen mit den ungefähren Abmessungen $500\ \mu\text{m} \times 500\ \mu\text{m}$ und zum Anderen die Windungen mit einer Breite von beispielsweise $50\ \mu\text{m}$. Hierbei erreicht man auf den einzelnen Spulenkörpern eine relativ homogene Abscheiderate von $0,1$ bis $0,2\ \mu\text{m}/\text{min}$. Dies lässt sich damit begründen, dass die flächenmäßig größeren Stirnseiten ungünstiger im elektrischen Feld der Plattenanoden stehen als die Windungsstrukturen.

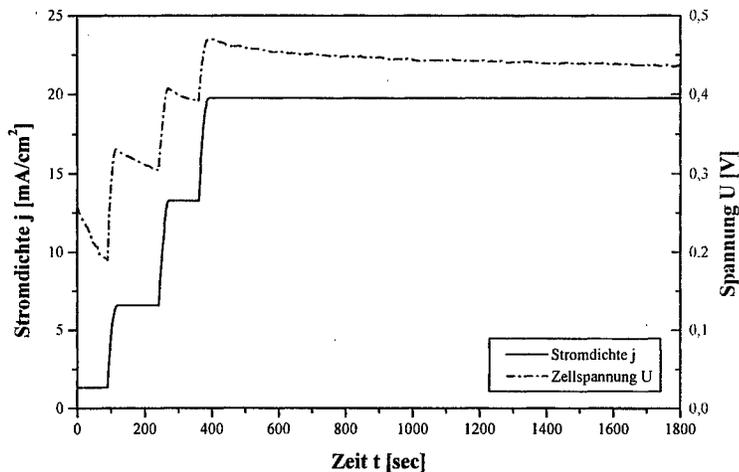


Abb. 4.31: Zeitlicher Verlauf von Stromdichte und Spannung während der galvanischen Kupferabscheidung

Ergebnisse

Die Oberfläche des galvanisch abgeschiedenen Kupfers erscheint im Elektronenmikroskop sehr glatt und porenarm. Der spezifische Widerstand des galvanisch abgeschiedenen Kupfers wurde mit Vierpunkt-Messung an Leitern mit einem Querschnitt von $20\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ untersucht. Dabei betrug der spezifische Widerstand $(2,08 \pm 0,08)\ \mu\Omega\text{cm}$. Für Leitungskupfer wird der spezifische Widerstand in der Literatur mit $1,78\ \mu\Omega\text{cm}$ angegeben [89K1]. Somit ist der spezifische Widerstand des galvanisch abgeschiedenen Kupfers um 17 % größer als der von Leitungskupfer.

Neben dem Photolack Eagle wurde auch der Lack Epon SU8 auf seine Eignung als Galvanoform untersucht. Dieser Photolack begünstigt die Anlagerung von Kupferkeimen während der galvanischen Abscheidung, weshalb im Extremfall das Kupfer über die Photolackstege hinaus wächst. Wie Abbildung 4.32 zeigt, erreicht man mit der SU8-Galvanoform keinen homogenen rechteckigen Windungsquerschnitt. Das aufgalvanisierte Kupfer bildet zu Beginn der Abscheidung einen u-förmigen Querschnitt, dessen Innenflächen im Verlauf der weiteren Abscheidung in Richtung Windungszentrum wachsen. Die

Anlagerung von Kupferkeimen auf den SU8-Photolackflächen wird dabei entscheidend durch den Pre- und Postexposurebake beeinflusst: Je länger die Backzeiten, desto geringer ist während der Abscheidung die Kupferanlagerung.

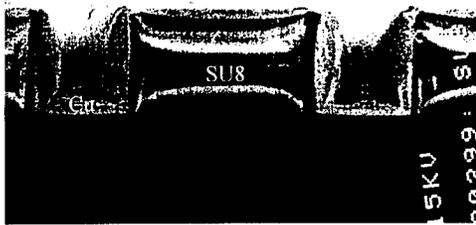


Abb. 4.32: Anlagerung von Kupfer an den SU8-Photolackstegen

Insgesamt ist der Photolack Epon SU8 für die Galvanoabformung von Kupfer wesentlich schlechter geeignet als der speziell für diese Technologie konzipierte Photolack Eagle. Dieser ist genügend resistent gegen den stark sauren Elektrolyten, die Anlagerung von Kupferkeimen wurde nie beobachtet und er lässt sich relativ einfach zwischen den erzeugten Kupferstrukturen entfernen. Die Abbildungen 4.33 und 4.34 zeigen die mit Kupfer aufgalvanisierten Windungen an der Spulenober- und -seitenkante.

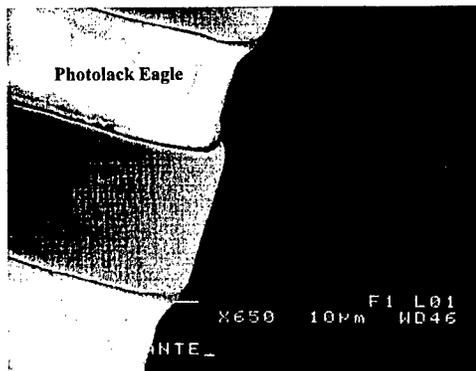


Abb. 4.33: Aufgalvanisierte Kupferwindung an der Spulenoberkante (650-fache Vergrößerung)

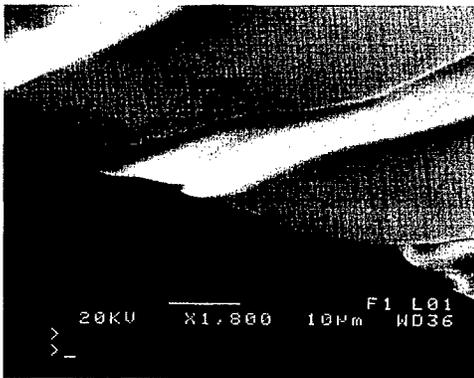


Abb. 4.34: Aufgalvanisierte Kupferwindung an der Spulenseitenkante (1800-fache Vergrößerung)

Die kritischste Stelle für den gesamten Herstellungsprozess stellt die Spulenkörperseitenkante dar. Hier treten die meisten Defekte auf, die in der Regel zu einem Ausfall des Bauteils führen. Kann die scharfe Seitenkante nicht vollständig belackt werden, so ist die Gefahr groß, dass die Windungen bei der galvanischen Abscheidung zusammen wachsen. Abbildung 4.35 zeigt Photolackstege, die an der Seitenkante eine Bruchstelle aufweisen. In diesem Fall ist die Photolackstruktur an der Kante gerade noch ausreichend, um ein Zusammenwachsen der Windungen zu verhindern. Deutlich erkennt man aber auch die Verdickung des Leiterquerschnitts im Bereich der Bruchstelle.

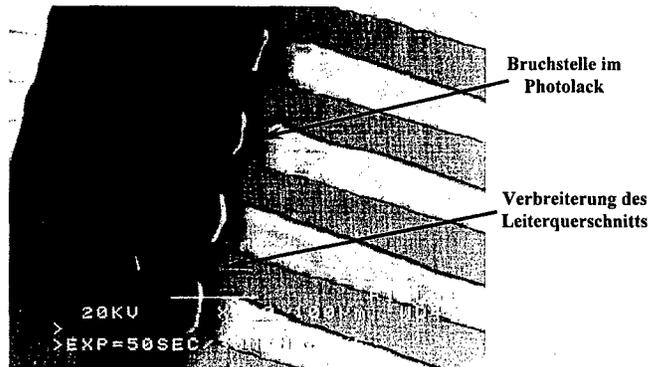


Abb. 4.35: Kupferwindungen über die Spulenseitenkante

4.4.2 Freistellen der Leiterbahnen

Ablösen der Photolackstrukturen

Ein gründliches Entfernen der Photolackstruktur ist deshalb besonders wichtig, da etwaige Photolackrückstände das Rückätzen der darunter liegenden Startmetallisierung unmöglich machen. Im Extremfall entstehen so Windungskurzschlüsse, die das Bauelement unbrauchbar machen. In jedem Fall wirken sich verbleibende metallisierte Mikroflächen in den Spacerbereichen ungünstig auf die Güte des Bauelements aus.

Die Photolackstege lassen sich gut mit dem organischen Lösungsmittel (Remover) MP 1165 der Fa. Micro Resist Technology entfernen, wobei dieser die Kupferwindungen nicht angreift. Das Ablösen lässt sich deutlich beschleunigen, wenn man das Lösungsmittelbad auf 40 °C bis 50 °C erhitzt. Der Photolack lässt sich so, obwohl er zwischen den Kupferwindungen mechanisch eingeklemmt ist, innerhalb von zwei Stunden vollständig stripfen. Eventuelle Photolackrückstände wurden anschließend mit einem DESCUM-Schritt (Sauerstoffplasma) im Plasmaätzter verascht.

Es gibt noch eine Reihe weiterer organischer Remover, die hier verwendet werden können. Darüber hinaus lässt sich der Photolack mit Aceton entfernen. Dieser ist aber weitaus aggressiver als der organische Remover und hinterlässt Rückstände auf den Windungen.

Rückätzen der Startmetallisierung

Das Rückätzen der 0,5 µm dicken Startmetallisierung kann gleichzeitig dazu genutzt werden, die Oberflächenmorphologie der Kupferwindungen zu verbessern. Dies ist insofern sinnvoll, als sich die Oberflächenrauigkeit aufgrund des Skineffektes maßhaltig auf die Güte des Bauelements auswirkt. Es bietet sich ein Elektropolieren der Substratoberfläche an.

Hierzu wurde die industrielle Elektropolitur 6100 der Fa. Degussa eingesetzt. Diese Elektropolitur ist ein stark saurer, anodisch arbeitender Elektrolyt zum Glänzen von Kupfer und Kupferlegierungen. Die Elektropolitur erfolgte bei einer Temperatur von 22 °C und einer Stromdichte von 100 mA/cm². Die Expositionszeit betrug 30 bis 50 sec. Der Hersteller gibt für eine Stromdichte von 100 bis 250 mA/cm² einen Abtrag von 2 bis 4 µm/min an [98D1]; somit liegt der Kupferabtrag an den Windungen in der Größenordnung von 1 µm.

Da beim elektrochemischen Rückätzen der Startmetallisierung auch der Strompfad zerstört wird, verbleiben nach der Elektropolitur kleine Kupferinseln in den Bereichen zwischen den Windungen. Diese werden in einem weiteren nasschemischen Ätzschritt entfernt. Dazu wird das Substrat 10 sec lang in einer wässrigen Lösung aus Schwefelsäure (10 % Vol.) und Wasserstoffperoxid (1 % Vol.) geschwenkt. In dieser Lösung werden außerdem die Palladiumkeime, die bei der stromlosen Metallisierung an der Oberfläche und in den Mikrokavitäten abgeschieden wurden, entfernt.

Neben der stromlos chemisch abgeschiedenen Kupfermetallisierung wurde auch das Metallsystem Titan/Kupfer als Startmetallisierung verwendet. In diesem Fall wird die Kupferschicht genauso entfernt wie die stromlos chemische Kupfermetallisierung. Anschließend wird die Titanschicht in einer 1 %-igen Flußsäurelösung zurückgeätzt. Diese greift weder die Kupferwindungen noch das Polyimid an, weshalb dieser Prozess als

unkritisch zu betrachten ist. Die Reaktion setzt nach etwa 1 min unter starker Gasentwicklung ein, wenn das natürliche Titanoxid (≈ 1 nm) geätzt wurde. Nach etwa 3 min ist die Titanschicht vollständig entfernt.

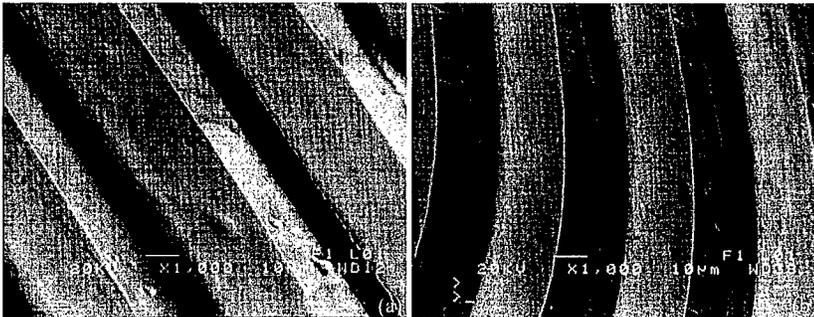


Abb. 4.36: Leiterbahnen nach dem Rückätzen der Startmetallisierung

Abbildung 4.36 zeigt Elektronenmikroskopaufnahmen der Spulenwindungen nach dem Rückätzen der Startmetallisierung. Sie demonstrieren, wie sich mit diesen Prozessen sehr glatte und porenarme Leiterbahnen erzeugen lassen. Abbildung 4.37 zeigt die Stereomikroskopaufnahme einer prozessierten Spule auf einem Spulenkörper der Fa. Bartels Mikrotechnik, wobei an der Seitenkante weder ein Windungsversatz noch eine Veränderung des Leiterbahnquerschnitts zu erkennen ist.



Abb. 4.37: Fertig prozessierte Spule auf einem Spulenkörper der Fa. Bartels Mikrotechnik

4.5 Dielektrische Passivierung

Der Windungsbereich der SMT-Spule muss gegen die Auflagefläche elektrisch isoliert und gleichzeitig vor mechanischen Belastungen durch eine Deckschicht geschützt werden. Zudem verhindert die Deckschicht den Kurzschluss der Windungen im Lötbad. Die im Folgenden als Schutzpassivierung bezeichnete Deckschicht soll ebenfalls im Batchprozess auf die Spule aufgebracht werden. Das bedeutet, dass das Passivierungsmaterial neben seiner Temperaturbeständigkeit und mechanischen Belastbarkeit auch photolithographisch strukturierbar sein muss. Darüber hinaus muss die Schutzpassivierung ein Negativ-Resist sein, da die Stümpfen bzw. Lötkontakte, welche senkrecht zur Lithographiemaske stehen, nicht belichtet werden können, aber auch nicht passiviert werden dürfen. Der auf Epoxydharz basierende Photolack Epon SU8 erfüllt diese Anforderungen. Alternativ dazu steht eine photosensitive Lötstopmmaske (Typ Ronacoat OPSR 5600, Fa. Shipley) oder ein Photoimid als Schutzpassivierung zur Diskussion.

Aufgrund der Semiadditiv-Technik erlaubt der MST-Prozess im Gegensatz zum Laserwendeln prinzipiell das Aufbringen mehrerer Leiterbahnebenen, wobei diese durch eine isolierende Schicht getrennt sein müssen. Steht eine geeignete photolithographisch strukturierbare Schutzpassivierung zur Verfügung, so kann diese auch als Trennschicht mit Durchkontakten zwischen den einzelnen Leiterbahnebenen verwendet werden.

Im Folgenden wird die Eignung des Photolacks SU8 als isolierende Trennebene mit Durchkontakten sowie als Schutzpassivierung untersucht.

4.5.1 Isolationsschicht mit Durchkontakten

Als Abscheideverfahren auf nicht-planaren Substraten kommt für den Lack SU8, wie unter 4.2.1 erörtert, die Sprühlackierung in Frage. Da die Schichtdickenhomogenität bei der isolierenden Trennschicht und bei der Schutzpassivierung unkritisch im Vergleich zur Leiterbahnerzeugung ist, können die Inhomogenitäten aufgrund der Sprühbelackung und des Lack-Reflows beim Aushärten des Lacks für die meisten Anwendungen (z.B. zweilagige Spule) akzeptiert werden. Für planare Demonstratoren ist der Lack-Reflow aufgrund der damit verbundenen Planarisierung ein positiver Effekt.

Als Demonstratoren mit mehreren Leiterbahnebenen, die SU8 als Trenn- und Schutzpassivierung verwenden, wurden eine Spule mit Zuleitung, eine zweilagige Spule, ein Kondensator und ein Übertrager realisiert. Abbildung 4.38 zeigt die drei Maskenebenen für die Herstellung einer Spule mit Zuleitung. Die Maske für die Schutzpassivierung wurde aus Gründen der Übersichtlichkeit weggelassen.

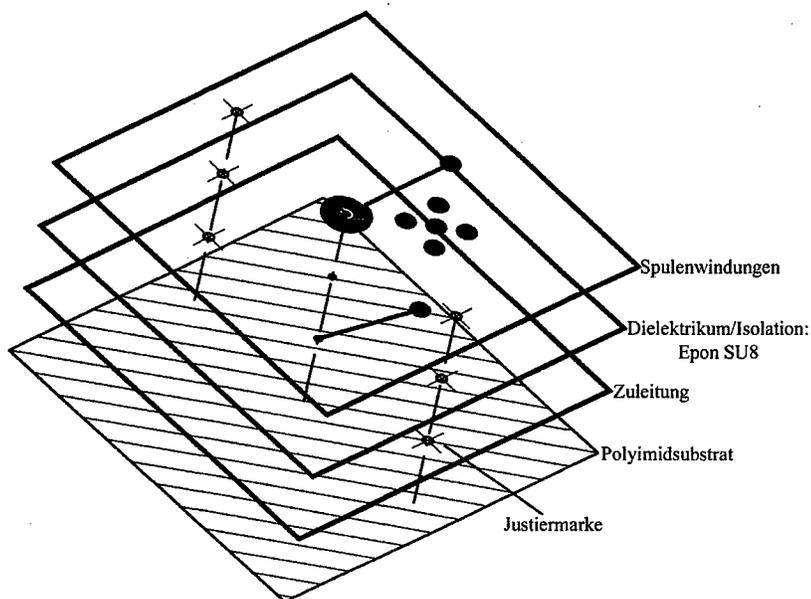


Abb. 4.38: Maskenebenen für die Herstellung einer Planarspule mit Zuleitung:
Die Zuleitung wird unter den Spulenwindungen durchgeführt, wobei eine SU8-Lackschicht die Zuleitung gegen die Windungen isoliert.

Die Isolationsschicht wurde nach dem Entwickeln für drei Stunden bei 120 °C ausgebacken, um alle Lösungs- und Bindemittel auszutreiben und um die Polymere maximal zu vernetzen. Dadurch erreicht der Lack eine glasartige Sprödigkeit und Härte, die ein erneutes Abscheiden metallischer Strukturen erst möglich macht. Zudem wird dadurch die Diffusion der Metallatome aus der nächsten Leiterbahnebene (ganzflächige Startmetallisierung) in den Lack reduziert. Eine solche Diffusion erhöht die Leitfähigkeit der Isolierschicht und damit die parasitären Verluste. Es konnte aber kein signifikanter Unterschied in der Leitfähigkeit zwischen unbehandelten Passivierungsschichten und solchen festgestellt werden, auf die eine Leiterbahnebene aufgebracht und wieder abgeätzt wurde.

Die Dicke der abgeschiedenen Passivierungsschicht betrug nach dem Ausbacken etwa 35 µm, also fast die doppelte Dicke der Leiterbahnstrukturen. Besonders vorteilhaft ist dabei der hohe Planarisierungsgrad des Photolacks, der das Abscheiden der nächsten Leiterbahnebene auf einem nahezu planen Untergrund ermöglicht. Somit können prinzipiell sehr viele Leiterbahnebenen, isolierend getrennt, gestapelt werden.

Am photolithographisch strukturierten Durchkontakt entsteht eine materialbedingte Inhomogenität in der Leiterbahn, da hier das galvanisch abgeschiedene Kupfer der unteren und der oberen Leiterbahnebene durch die Startmetallisierung der oberen Ebene getrennt wird. Um elektromagnetische Streuverluste zu minimieren, muss deshalb für die

Startmetallisierung ausschließlich Kupfer verwendet und zusätzlich vor der Abscheidung die natürliche Kupferoxidschicht am Durchkontakt entfernt werden. Abbildung 4.39 zeigt die Mikroskopaufnahmen einer zweilagigen Spule am Durchkontakt und die drei unteren Leiterbahnebenen eines Übertragers.

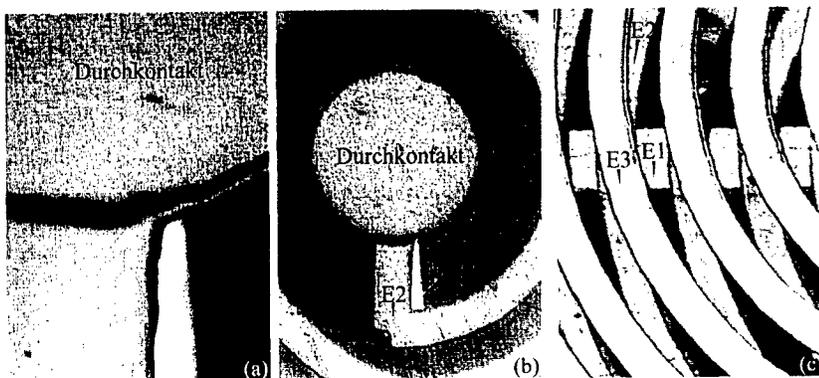


Abb. 4.39: Lichtmikroskopaufnahmen von Leiterbahnebenen, die durch eine 35 µm dicke SU8-Schicht (optisch transparent) isolierend getrennt werden:
a und b) Zweilagige Spule am Durchkontakt
c) Die drei unteren Leiterbahnebenen eines Übertragers

Obwohl in der Halbleiter- und Mikrosystemtechnik ausschließlich Keramiken wie Siliziumoxid und Siliziumnitrid als isolierende Trennschichten zwischen zwei Leiterbahnebenen eingesetzt werden, demonstrieren die in Planartechnik realisierten Induktivitäten, dass für diese Bauelemente auch ein photolithographisch strukturierbarer Kunststoff eingesetzt werden kann. Voraussetzung ist allerdings, dass sich der Kunststoff bis zu einer nahezu glasartigen Härte ausbacken lässt.

4.5.2 Schutzpassivierung

Um den Lack Epon SU8 auf seine Tauglichkeit als Schutzpassivierung zu untersuchen, wurden SMT-Spulen der Bauform 0603 nach dem Laserwendeln der Windungen der laufenden Fertigung entnommen, mit Epon SU8 belackt (Abbildung 4.40) und zum Verzinnen der Stirnseiten wieder in die Fertigung eingeschleust.

Die Belackung der SMT 0603-Spulen erfolgte mit einem Dispenser. Dabei wurde auf die schnell rotierende Spule ein kleiner Tropfen des Photolacks SU8-5 gegeben. Anschließend wurde die rotierende Spule 30 sec lang bei einer Temperatur von 150 °C gefönt (Softbake), 15 sec mit UV-Licht bestrahlt und nochmals 30 sec gefönt (Postexposurebake).

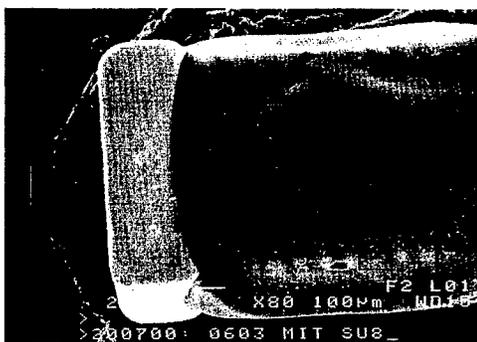


Abb. 4.40: SMT-Spule der Bauform 0603; belackt mit Epon SU8

Die so belackten und anschließend verzinnnten Spulen wurden sechs unterschiedlichen Eignungstests unterzogen, die in Tabelle 4.11 einschließlich des Testergebnisses kurz beschrieben sind.

Nr.	Kurzbeschreibung des Tests	Ergebnis
1	Einzelchip auf Leiterplatte vor und nach dem Einlöten	Bestanden
2	125 °C Temperaturbelastung und 300 mA Strombelastung (auf Leiterplatte) für 2000 Stunden	Bestanden
3	150 °C Temperaturbelastung (auf Leiterplatte) für 2000 Stunden	Bestanden
4	85 °C Temperaturbelastung und 85 % relative Luftfeuchte (auf Leiterplatte) für 56 Tage	Bestanden
5	Lötwärmebeständigkeit bei 260 °C für 10 sec	Nicht bestanden
6	Rascher Temperaturwechseltest zwischen -55 °C und 125 °C	Nicht bestanden

Tab. 4.11: Die mit SU8 belackten Spulen wurden sechs Eignungstests unterzogen. Davon haben sie den Lötwärmetest (5) und die raschen Temperaturwechsel (6) nicht bestanden.

Auf die nicht bestandenen Eignungstests soll im Folgenden detaillierter eingegangen werden:

Lötwärmebeständigkeit

Die Lötwärmebeständigkeit wurde an zehn Spulen in einem 260 °C heißen Lötbad für 10 sec getestet. Vor und nach dem Lötbadtest wurden die Induktivität und Güte bei 100 MHz sowie der Gleichstromwiderstand gemessen. Tabelle 4.12 zeigt die statistische Analyse der Stichprobe mit zehn belackten Spulen. Für die Induktivität und die Güte liegen die Messwertabweichungen innerhalb des Toleranzbereiches von $\Delta L/L_0 = \pm 3 \%$ bzw. $\Delta Q/Q_0 = \pm 20 \%$. Die Widerstandsmessung ergab dagegen, dass vier Messwerte außerhalb des

Toleranzbereichs von $\Delta R/R_0 = \pm 3\%$ liegen. Somit haben insgesamt nur sechs von zehn mit SU8 belackten Spulen den Lötwärmetest bestanden.

	L_0 [nH]	L_1 [nH]	$\Delta L/L_0$	Q_0	Q_1	$\Delta Q/Q_0$	R_0 [Ω]	R_1 [Ω]	$\Delta R/R_0$
a: Maximum	32,870	32,912	1,0 %	15,55	15,24	4,6 %	0,5924	0,5930	17,3 %
b: Mittelwert	32,544	32,566	0,1 %	14,99	15,01	0,2 %	0,5029	0,5031	0,5 %
c: Minimum	32,241	32,140	-0,9 %	14,52	14,60	-2,1 %	0,4690	0,4703	-20,6 %
d: s	0,236	0,265	0,6 %	0,34	0,21	2,2 %	0,0393	0,0394	9,7 %
e: Ausfälle	0			0			4		
f: Toleranz	$\pm 3\%$			$\pm 20\%$			$\pm 3\%$		

Tab. 4.12: Statistische Analyse der Stichprobe 'Lötwärme' mit 10 SU8-belackten 0603-Spulen:

- a) Maximaler Wert der Stichprobe b) Mittelwert der Stichprobe
 c) Minimaler Wert der Stichprobe d) Standardabweichung s
 e) Ausfälle f) Zulässige Toleranz

Rasche Temperaturwechsel

Zehn weitere, auf eine Platine gelötete Spulen wurden dem raschen Temperaturwechseltest unterzogen. Die Induktivität, die Güte und der Widerstand wurden dazu nach 0, 100, 200 und 500 Temperaturwechseln gemessen. Die Temperaturwechsel erfolgten im Zeitintervall von 15 min zwischen -55 °C und $+125\text{ °C}$. Nach 100 Temperaturwechseln war bereits ein Bauelement definitiv ausgefallen, und bei einer Spule hatte sich der Widerstand um mehr als 4 % erhöht. Nach 200 Temperaturwechseln sind neun Bauelemente ausgefallen. Die verbleibende gute Spule ist nach insgesamt 500 Temperaturwechseln ausgefallen. Tabelle 4.13 zeigt die statistische Analyse der Messung.

	L_0 [nH]	$\Delta L_{100}/L_0$	$\Delta L_{200}/L_0$	Q_0	$\Delta Q_{100}/Q_0$	$\Delta Q_{200}/Q_0$	R_0 [Ω]	$\Delta R_{100}/R_0$	$\Delta R_{200}/R_0$
a: Maximum	33,6020	0,7%	-	15,67	10,8%	39,7%	0,5854	4,7%	6,1%
b: Mittelwert	33,0328	0,2%	-	15,45	0,7%	14,7%	0,5110	-9,4%	-78,1%
c: Minimum	32,6160	0,0%	-	15,15	-2,8%	-23,4%	0,4518	-99,8%	-98,9%
d: s	0,3331	0,3%	-	0,16	3,7%	22,6%	0,0461	31,8%	42,9%
e: Ausfälle	0	1	9	0	0	3	0	2	9
f: Toleranz	$\pm 4\%$			$\pm 30\%$			$\pm 4\%$		

Tab. 4.13: Statistische Analyse der Stichprobe 'Rasche Temperaturwechsel' mit 10 Spulen:

- a) Maximaler Wert der Stichprobe b) Mittelwert der Stichprobe
 c) Minimaler Wert der Stichprobe d) Standardabweichung s
 e) Ausfälle f) Zulässige Toleranz

Die Ursache für den Ausfall so vieler Bauelemente lässt sich mit den beim Temperaturwechseltest auftretenden Verspannungen zwischen Substrat, Leiterbahnen und Schutzpassivierung begründen: Die Längenausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien Aluminiumoxid, Kupfer und Photolack SU8 weichen erheblich voneinander ab (Tabelle 4.14). Der Photolack wurde bei 150 °C vernetzt. Das bedeutet, dass die Schnittstelle zwischen Substrat, Leiterbahn und Photolack bei dieser Temperatur aufeinander angepasst wurde. Wird das Bauelement auf -55 °C abgekühlt, so ergibt sich

die Differenz der Längenänderungen δ zwischen Spulenkörper und Schutzpassivierung entlang der Bauelementbreite entsprechend der Formel:

$$\delta_{12} := \Delta l_1 - \Delta l_2 = l_0 \cdot (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \Delta T \quad (4.7)$$

Dabei ist l_0 die Breite des Bauelements, α_i die Längenausdehnungskoeffizienten der beteiligten Materialien und ΔT der Temperaturunterschied zwischen -55 °C und der Aushärtungstemperatur T_H für den Photolack. Tabelle 4.14 zeigt die Werte für α für die beteiligten Materialien und für δ für die Baugrößen 0603 und 0402 bei unterschiedlichen Aushärtungstemperaturen.

Funktion im Bauelement	Material	$\alpha [10^{-6} \cdot K^{-1}]$	$\delta [\mu m]$ Baugröße 0603 $T_H = 150\text{ °C}$	$\delta [\mu m]$ Baugröße 0402 $T_H = 95\text{ °C}$
Spulenkörper [α_S]	Al_2O_3	8	0,0	0,0
Leiterbahn [α_{Cu}]	Kupfer	17	1,5	0,7
Schutzpassivierung [α_{SU8}]	Epon SU8	52	7,2	3,3

Tab. 4.14: Längenausdehnungskoeffizient α im Temperaturbereich von 20 °C bis 100 °C
In den letzten beiden Spalten ist der Wert δ für die Baugröße 0603 und $T_H = 150\text{ °C}$
sowie für die Baugröße 0402 und $T_H = 95\text{ °C}$ angegeben.

Durch die häufigen Temperaturwechsel werden die Leiterbahnen der Spule durch die auftretenden alternierenden Verspannungen zwischen den Materialien mechanisch belastet, was auf Dauer zu einer Materialermüdung und schließlich zum Bruch der Leiterbahnen führt. Die auftretenden Verspannungen lassen sich reduzieren, indem man den Photolack SU8 bei einer deutlich niedrigeren Temperatur aushärtet [97D1]. Zudem werden die Verspannungen durch den Shrink auf eine kleinere Bauform reduziert. Wie die Abschätzung in Tabelle 4.14 zeigt, lassen sich die Verspannungen um 55 % reduzieren, wenn man den Lack bei seiner Glastemperatur $T_G = 95\text{ °C}$ (unvernetzt) aushärtet und auf die Bauform 0402 übergeht. Da der Ausdehnungskoeffizient von LCP etwas größer ist als der von Al_2O_3 , werden die Verspannungen bei den MST-Spulen um rund 60 % gegenüber den lasergewendelten Spulen der Bauform 0603 reduziert. Die durchzuführenden Temperaturwechseltests werden zeigen, ob diese Spannungsreduzierung bereits ausreicht, um die geforderten 1000 Temperaturwechsel zu bestehen.

Verzinnen und Vereinzeln

Auf die Stirnflächen der lasergewendelten Induktivitäten wird eine $2\text{ }\mu m$ dicke Nickelsperrschicht und darauf eine $10\text{ }\mu m$ dicke Reinzinnschicht als Lötfläche galvanisch abgeschieden, wobei die Abscheidung im Schüttgut erfolgt [99E1]. Diese galvanischen Prozesse sind mit dem MST-Batchprozess gut verträglich und können für die Fertigung der Bauform 0402 übernommen werden. Da die Galvanikprozesse sowohl für Gestellware, also Batchprozessierung, als auch für Trommelware, also Schüttgutprozessierung, geeignet sind, kann das Verzinnen der Lötflächen entweder vor oder nach dem Vereinzeln erfolgen. Die Spulenkörper sind auf dem Substrat so angeordnet, dass sie sich durch einfache Schnitte aus dem Substratverband lösen lassen. Dazu bietet sich eine Diamantsäge an, wie sie zum Vereinzeln der Chips aus dem Siliziumwafer in der Halbleitertechnik verwendet wird [00D1].

5. Elektrische Charakterisierung

Eine typische Anwendung für SMT-Induktivitäten kleiner Bauform ist der Aufbau von Schwingkreisen und die Impedanzanpassung in Endgeräten für die Mobilfunktechnik, weshalb die Induktivitäten bei hohen Frequenzen bis zu 2 GHz betrieben werden. Bei der Charakterisierung der elektrischen Eigenschaften interessiert deshalb besonders das Verhalten bei hohen Frequenzen. Die hergestellten Induktivitäten wurden bis 3,0 GHz untersucht.

5.1 Messaufbau und Auswertung

Für die Hochfrequenzmessungen stand ein Netzwerkanalysator von der Fa. Hewlett Packard, Typ HP 8753D zur Verfügung, mit dem die S-Parameter an Ein- und Zweitoren bis zu einer Frequenz von 5 GHz bestimmt werden können. Abbildung 5.1 zeigt den schematischen Aufbau für die Hochfrequenzmessungen an den Induktivitäten.

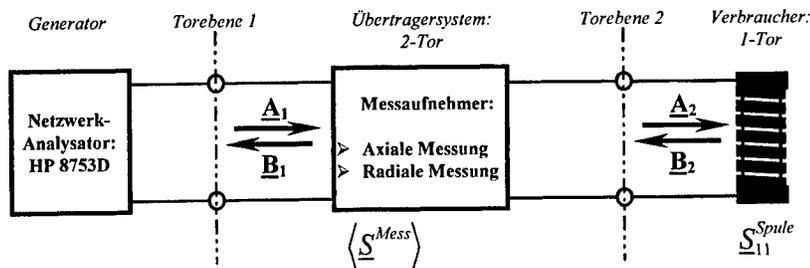


Abb. 5.1: Schematischer Messaufbau zur Bestimmung des Streuparameters S_{11} an einem 1-Tor

5.1.1 Streuparameter

Die klassischen Widerstands- und Leitwertparameter sind für Frequenzen, oberhalb derer die geometrischen Abmessungen nicht mehr klein gegenüber der Wellenlänge sind, kaum noch messbar. Auch die Wellenparameter wie z.B. der Wellenwiderstand sind bei sehr hohen Frequenzen nur bedingt messbar, wobei die Frequenzgrenze für die Niederfrequenzmodelle bei etwa 100 MHz liegt.

Für höhere Frequenzen sind nur die Streuparameter gut verwendbar und messbar [80H1]. In diesem Hochfrequenzmodell wird der elektromagnetische Energieübertrag durch hin- und rücklaufende Wellen \underline{A} und \underline{B} beschrieben:

$$\underline{A} = \sqrt{\underline{U}_{Hm} \cdot \underline{I}_{Hm}} = \frac{\underline{U}_{Hm}}{\sqrt{\underline{Z}_W}} = A \cdot e^{j\varphi_{Hm}} \quad (5.1)$$

Dabei kann der Wellenwiderstand Z_w prinzipiell beliebig gewählt werden, wird aber in der Regel auf den realen Bezugswiderstand $Z_0 = 50 \Omega$ normiert. Das Betragsquadrat der hin- und rücklaufenden Wellen ist proportional zur transportierten Leistung:

$$P_{Hin} = \frac{1}{2} \cdot |A|^2 \quad \text{und} \quad P_{Rück} = \frac{1}{2} \cdot |B|^2. \quad (5.2)$$

Ein Übertragungssystem mit n Klemmenpaaren bzw. elektrischen Eingängen, bezeichnet als n -Tor, wird in diesem Modell mit einer Matrix beschrieben, die jede auslaufende Welle mit jeder einlaufenden Welle entsprechend Gleichung (5.3) verknüpft [98N1].

$$\begin{pmatrix} B_1 \\ \dots \\ B_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_{11} & \dots & S_{1n} \\ \dots & \dots & \dots \\ S_{n1} & \dots & S_{nn} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} A_1 \\ \dots \\ A_n \end{pmatrix} \quad (5.3)$$

Dabei werden die Matrix S als Streumatrix und die einzelnen Matrixelemente als Streuparameter bezeichnet. Im Folgenden sollen nur die hier relevanten Fälle für $n = 1$, wie beispielsweise eine Induktivität, und $n = 2$, wie beispielsweise einen einfachen Übertrager aus zwei gekoppelten Induktivitäten, betrachtet werden.

Eintorsystem

Für das Eintorsystem reduziert sich die Streumatrix auf den S_{11} -Streuparameter, der in der Leitungstheorie auch als Reflexionsfaktor r bezeichnet wird, und es gilt:

$$r := S_{11} = \frac{B}{A} = \frac{U_{Rück}}{U_{Hin}} \quad (5.4)$$

Zur Charakterisierung von Eintoren wird der Reflexionsfaktor üblicherweise im Smith-Diagramm dargestellt. So lassen sich die Messergebnisse ohne größere Umrechnungen einfach verwenden. Das Smith-Diagramm bildet die Gaußsche Zahlenebene auf einen Kreis mit endlichem Durchmesser entsprechend der folgenden Abbildungsvorschrift ab:

$$\underline{W} = \frac{\underline{Z} - 1}{\underline{Z} + 1} \quad (5.5)$$

Ist der Reflexionsfaktor des Eintorsystems bekannt, so lässt sich daraus die Impedanz \underline{Z} berechnen:

$$\underline{Z} = \frac{U}{I} = \frac{U_{Hin} + U_{Rück}}{I_{Hin} - I_{Rück}} = Z_0 \cdot \frac{1+r}{1-r} \quad (5.6)$$

Aus der komplexwertigen Impedanz lassen sich wiederum Wirkwiderstand R , Induktivität L und die Güte Q der Spule spezifizieren:

$$R = \text{Re}(\underline{Z}), \quad (5.7.a)$$

$$L = \frac{\text{Im}(Z)}{\omega}, \quad (5.7.b)$$

$$Q = \frac{\text{Im}(Z)}{\text{Re}(Z)}. \quad (5.7.c)$$

Zweitorsystem

Am Zweitorsystem treten zusätzlich zu den Reflexionsfaktoren \underline{S}_{11} und \underline{S}_{22} am elektrischen Ein- und Ausgang die Übertragungsfaktoren \underline{S}_{12} und \underline{S}_{21} auf. Abbildung 5.2 zeigt eine schematische Darstellung der Energieübertragung am Zweitor.

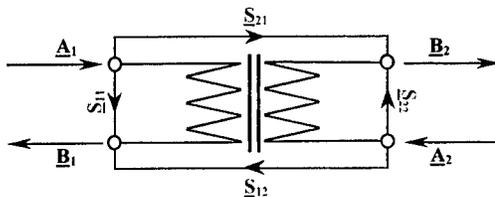


Abb. 5.2: Schematische Darstellung der Energieübertragung an einem Zweitor

Die S-Parameter lassen sich mit dem Netzwerkanalysator im abgeschlossenen Zustand des Zweitores messen:

- Zur Messung von \underline{S}_{11} und \underline{S}_{21} wird am Eingang eingespeist und der Ausgang reflexionsfrei mit dem Bezugswiderstand Z_0 abgeschlossen, weshalb $\underline{A}_2 = 0$ ist. Daraus ergibt sich:

$$\underline{S}_{11} = \frac{B_1}{A_1} \quad \text{und} \quad \underline{S}_{21} = \frac{B_2}{A_1}. \quad (5.8)$$

- Zur Messung von \underline{S}_{12} und \underline{S}_{22} wird der Eingang reflexionsfrei abgeschlossen und am Ausgang eingespeist, weshalb $\underline{A}_1 = 0$ ist. Daraus ergibt sich:

$$\underline{S}_{12} = \frac{B_1}{A_2} \quad \text{und} \quad \underline{S}_{22} = \frac{B_2}{A_2}. \quad (5.9)$$

Es sei darauf hingewiesen, dass die S-Parameter des Zweitores, im Gegensatz zu den NF-Parametersystemen, von der äußeren Beschaltung abhängen. Deshalb ergeben sie nur zusammen mit der zusätzlichen Angabe des Bezugswiderstandes die vollständigen Übertragungseigenschaften.

5.1.2 Messaufnehmer und Messplatzkalibrierung

Für die genaue Messung des Reflexionsfaktors der SMT-Induktivitäten müssen die elektrischen Anschlüsse, also die verkupferten Stirnseiten¹ der Spulen, niederohmig, definiert und möglichst verlustfrei mit dem Messaufnehmer verbunden werden. Von einem Einlöten der Spulen in den Messaufnehmer wurde abgesehen, um sowohl einen schnellen Ein- und Ausbau der Spulen zu ermöglichen als auch um etwaige Einflüsse unterschiedlich großer Lötminisken auf die Messung zu unterdrücken. Außerdem ist die Gefahr, beim Einlöten der Spulen mit dem Lötzinn Kurzschlüsse auf dem ungeschützten Windungsbereich zu verursachen, sehr groß. Prinzipiell lassen sich die Spulen aufgrund ihres Aufbaus axial oder radial kontaktieren (Abbildung 5.3).

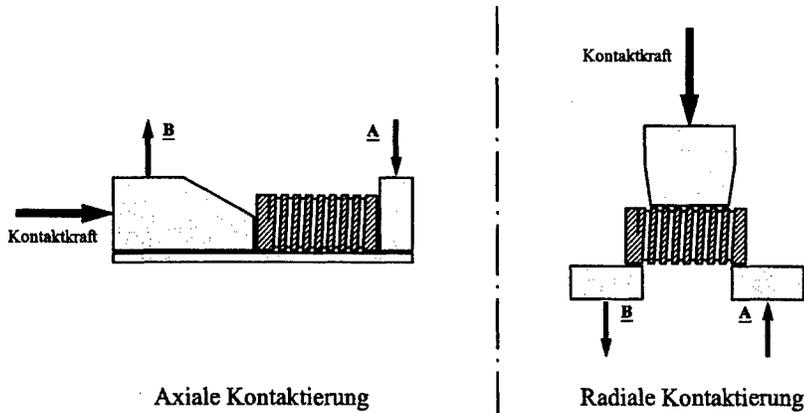


Abb. 5.3: Möglichkeiten zum Kontaktieren der SMT-Spulen im Messaufnehmer ohne Einlöten:
a) Axiale Kontaktierung b) Radiale Kontaktierung

Axiale Kontaktierung

Für die axiale Kontaktierung der Spulen wurde ein Messaufnehmer aus Messing angefertigt, der direkt auf den Netzwerkanalysator aufgeschraubt werden kann (Abbildung 5.4). Die Zuleitung, normiert auf 50Ω , wurde dabei möglichst kurz gestaltet, um ein breitbandiges Messen bis zu sehr hohen Frequenzen zu ermöglichen. Der 90° -Winkel zwischen Torebene 1 und dem Messaufnehmer erwies sich dabei für die Messplatzkalibrierung bei hohen Frequenzen als ungünstig.

¹ Die prozessierten Induktivitäten wurden vor dem Verzinnen und Passivieren vermessen.

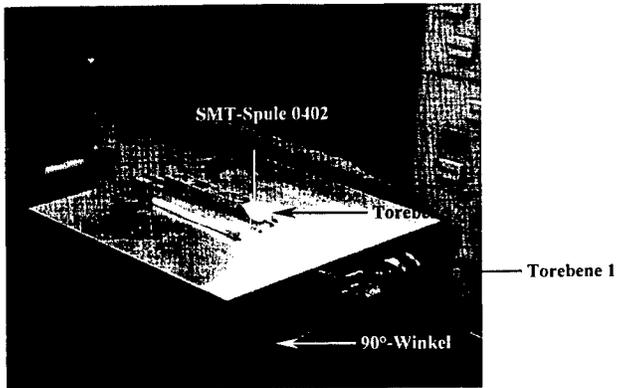


Abb. 5.4: Messaufnehmer für die axiale Kontaktierung der Spulen

Die Stirnflächen der im Substratverband prozessierten Spulen sind im Bereich der Haltestege nicht metallisiert. Darüber hinaus ließen sich die Spulen nicht exakt auf der Ebene der Stirnflächen aus dem Substratverband trennen, weshalb der nicht-metallisierte Bereich der Stirnflächen über die metallisierten Bereiche hinaussteht (Abbildung 5.5). Dies macht eine definierte, axiale Kontaktierung schwierig.



Abb. 5.5: Stirnfläche einer im Substratverband prozessierten Spule

Radiale Kontaktierung

Für die radiale Kontaktierung stand eine Messklemme von der Fa. Hewlett Packard, Typ HP 16193 A zur Verfügung. Hierbei wird die Spule mit einem Kunststoffbolzen, der auf den Windungen der Spule aufsitzt, auf die Messspole gedrückt (Abbildung 5.3). In diesem Fall ist zwar die Kontaktierung der Stirnflächen einfacher, aber bei mehreren Spulen wurden die ungeschützten Windungen durch die Auflagekraft des Kunststoffbolzens beschädigt oder gar durchtrennt. Drückt der Bolzen nicht genau senkrecht auf die Spule, so springt diese aufgrund der Scherkräfte aus der Messklemme. Darüber hinaus beeinflusst die Anpresskraft bei der radialen Methode das Messergebnis stärker als bei der axialen Messung.

Beide Kontaktierungsarten haben Vor- und Nachteile in der Handhabung: Für Spulen mit einer Schutzpassivierung ist die radiale Kontaktierung besser geeignet, wohingegen sich für ungeschützte Spulen die axiale Kontaktierung empfiehlt.

Messplatzkalibrierung

Die am Messobjekt bzw. der Spule ein- und auslaufenden Wellen werden über die Messklemme auf den Analysator übertragen. Um den \underline{S}_{11} -Parameter der Spule berechnen zu können, müssen deshalb die Streuparameter der Messklemme bestimmt werden. Aus Gleichung (5.3) lässt sich gemäß Abbildung 5.1 der \underline{S}_{11} -Parameter der Spule wie folgt berechnen:

$$\underline{S}_{11}^{Spule} = \frac{\underline{S}_{11}^{Mess} \cdot \underline{A}_1 - \underline{B}_1}{\det(\underline{S}^{Mess}) \cdot \underline{A}_1 - \underline{S}_{22}^{Mess} \cdot \underline{B}_1} \quad (5.10)$$

Mit dem Netzwerkanalysator lassen sich die Streuparameter der Messklemme aus dem Gleichungssystem bestimmen, das man erhält, wenn die Messklemme am Ausgang mit den definierten Zuständen $\underline{Z} = \infty$ (Leerlauf), $\underline{Z} = 0$ (Kurzschluss) und $\underline{Z} = 50 \Omega$ (Reflexionsfrei) abgeschlossen wird. Das Problem der Messplatzkalibrierung besteht also darin, diese drei Zustände über den gesamten Messbereich von 0 bis 3 GHz möglichst gut zu realisieren. Es wurden zwei Methoden für die Messplatzkalibrierung verwendet:

- Method I: Kalibrierung auf der Torebene 2
Für den definierten Kurzschluss stand ein Messingblock der Bauform 0603 von der Fa. Hewlett Packard zur Verfügung. Für den reflexionsfreien Abschluss der Messklemme wurde ein 50Ω -Widerstand der Bauform 0402 ausgemessen, der diese Bedingung im Messbereich möglichst gut erfüllt. Für den Leerlaufzustand wurde die Messklemme genau wie zur Messung der Induktivitäten eingestellt, aber offen gelassen.
- Method II: Kalibrierung auf der Torebene 1
Für die Kalibrierung der Torebene 1 stand ein hochpräziser Kalibrierstandard von der Fa. Hewlett Packard zur Verfügung. Nun wird die Annahme gemacht, dass sich der Messaufnehmer wie ein kurzes Stück einer idealen, homogenen Leitung der elektrischen Länge l verhält. Er bewirkt also lediglich eine Phasenverschiebung der

ein- und auslaufenden Wellen um $\Delta\varphi = \frac{\omega}{c} \cdot l$, womit sich in dieser Näherung für die Streumatrix des Messaufnehmers schreiben lässt:

$$\underline{S}^{Mess} \approx \begin{pmatrix} 0 & e^{-j\frac{\omega}{c}l} \\ e^{-j\frac{\omega}{c}l} & 0 \end{pmatrix} \quad (5.11)$$

Die elektrische Länge l des Messaufnehmers kann experimentell wie folgt ermittelt werden: Der Netzwerkanalysator ermöglicht die mathematische Addition einer elektrischen Länge. Diese wird so gewählt, dass für die in den Messaufnehmer eingesetzten Bezugswiderstände das Messergebnis möglichst gut in den entsprechenden Punkten $\underline{Z} = \infty$, $\underline{Z} = 0$ und $\underline{Z} = 50 \Omega$ des Smith-Diagramms liegt. Die elektrische Länge beträgt für den radialen Messaufnehmer etwa 23 mm und für den axialen Messaufnehmer etwa 29 mm.

Damit ergibt sich der \underline{S}_{11} -Parameter der Spule aus den an der Torebene 1 ein- und auslaufenden Wellen und der experimentell ermittelten elektrischen Länge des Messaufnehmers:

$$\underline{S}_{11}^{Spule} \approx \frac{B_1}{A_1} \cdot e^{j2\frac{\omega}{c}l} \quad (5.12)$$

Der axiale Messaufnehmer ließ sich mit Methode I mit höherer Genauigkeit kalibrieren. Zum Einen sind hier die Leitungswege länger als beim radialen Messaufnehmer, und zum Anderen befindet sich zwischen Torebene 1 und 2 ein rechter Winkel, weshalb hier die Annahme der idealen, homogenen Leitung nicht genügend gut erfüllt ist. Im Gegensatz dazu ließ sich der radiale Messaufnehmer mit Methode II mit höherer Genauigkeit kalibrieren. Diese Methode wird auch mit dem selben Messaufnehmer bei der Fa. Epcos für die elektrische Charakterisierung der SMT-Induktivitäten durchgeführt.

5.2 Demonstratoren in Planartechnik

Die einzelnen Prozessschritte zur Leiterbilderzeugung wurden zuerst am Beispiel von planaren Demonstratoren aufeinander abgestimmt und anschließend für die Herstellung der 3D-Spulen verbessert. Im folgenden Abschnitt werden die Messungen an den planaren Demonstratoren präsentiert. Da nur bis zur ersten Resonanzfrequenz gemessen wurde und diese für alle planaren Demonstratoren unter 1 GHz lag, war aufgrund der 'niedrigen' Frequenzen die Messplatzkalibrierung unproblematisch: Die Demonstratoren wurden direkt über SMA-Stecker kontaktiert. Mit einem Kalibrierstandard der Fa. Hewlett Packard für SMA-Stecker wurde der Netzwerkanalysator auf der Torebene 2 kalibriert.

Planare Spulen

Es wurden zwei Typen von Planarspulen angefertigt. Der Spulentyp I ist aus 19,5 quadratischen und der Spulentyp II aus 12 kreisförmigen Windungen aufgebaut. Abbildung 5.6 zeigt die Dimensionen der beiden Spulentypen. Die mittlere Metallisierungshöhe betrug $17\ \mu\text{m}$. Die Leiterbahnbreite und der Leiterabstand sind äquidistant: $50\ \mu\text{m}$ bei Spulentyp I und $100\ \mu\text{m}$ bei Spulentyp II.

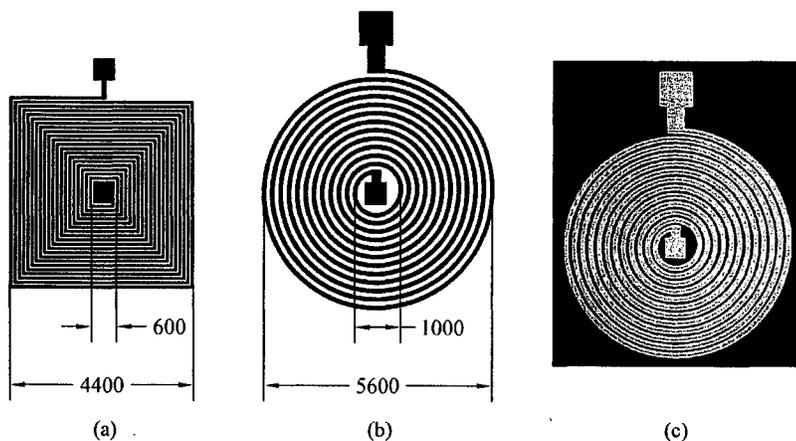


Abb. 5.6: Planarspulen, die mit der Semi-Additivtechnik hergestellt wurden. Die Abmessungen sind in μm angegeben.

- a) Spulentyp I: 'Eckige' Windungen mit $50\ \mu\text{m}$ Strukturbreite
- b) Spulentyp II: 'Runde' Windungen mit $100\ \mu\text{m}$ Strukturbreite
- c) Mikroskopaufnahme vom Spulentyp II

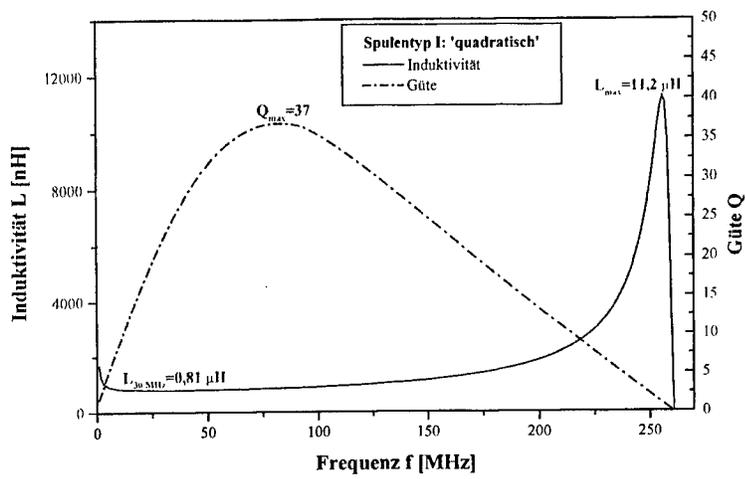


Abb. 5.7: Induktivität und Güte der eckigen Planarspulen (Typ I)
Die Graphik zeigt den Mittelwert über 21 gemessene Spulen.

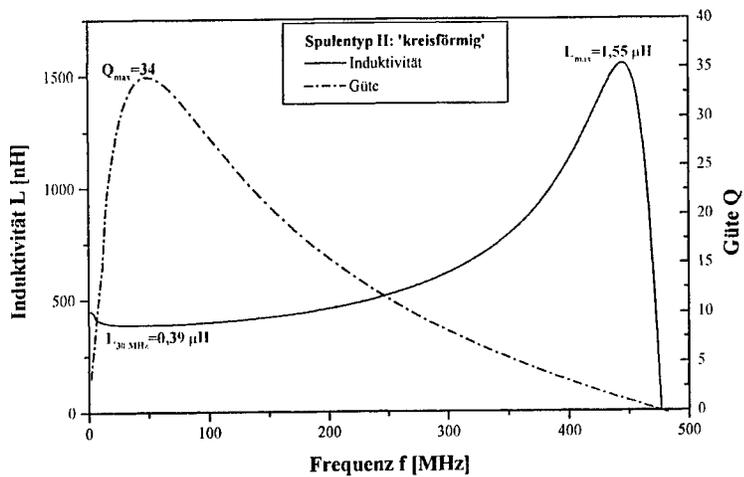


Abb. 5.8: Induktivität und Güte der runden Planarspulen (Typ II)
Die Graphik zeigt den Mittelwert über 21 gemessene Spulen.

Abbildung 5.7 und 5.8 zeigen den Mittelwert der Induktivität (rote Kurve) und der Güte (blaue Kurve) von 21 vermessenen Spulen, die alle parallel auf einem Substrat hergestellt wurden. Die Resonanzfrequenz beträgt für den Spulentyp I $f_R = 261$ MHz und für den Spulentyp II $f_R = 477$ MHz. Für Frequenzen weit unterhalb der Resonanzfrequenz ist die Induktivität nahezu konstant und die Güte erreicht hier ihren maximalen Wert. Für diese Planarspulen liegt die maximale Güte bei etwa 35 und ist damit um den Faktor 3,3 kleiner als für die hergestellten 3D-Spulen, obwohl die verwendeten Materialien und Prozessschritte die selben sind. Diese Tatsache und die niedrigen Resonanzfrequenzen bei den Planarspulen sind der Grund, weshalb man die miniaturisierten SMT-Induktivitäten nicht in planarer Dünnschichttechnologie herstellt. Die planare Dünnschichttechnologie hat aber auch Vorteile. Die Induktivitäten lassen sich mit wesentlich geringeren Fertigungstoleranzen herstellen. Die Toleranzklasse G ($\pm 2\%$) ist in dieser Technologie kein Problem, obwohl sie für die 3D-Spulen erhebliche Schwierigkeiten bereitet.

Plattenkondensator

Um die Permittivitätszahl einer extrem ausgebackenen Schutzpassivierung aus dem Photolack Epon SU8 zu ermitteln, wurden Plattenkondensatoren mit einer Plattenfläche von $25,00 \text{ mm}^2$ (Typ I) und $6,22 \text{ mm}^2$ (Typ II) angefertigt. Die Dicke des Dielektrikums lag zwischen $27 \text{ }\mu\text{m}$ und $33 \text{ }\mu\text{m}$. Die Metallisierungshöhe betrug $20 \text{ }\mu\text{m}$. Abbildung 5.9 zeigt die spezifizierte Kapazität $C_{\text{eff}} = -(\omega \cdot \text{Im}(Z))^{-1}$ (rote Kurve) und die Güte (blaue Kurve). Die maximale Güte liegt bei etwa 30.

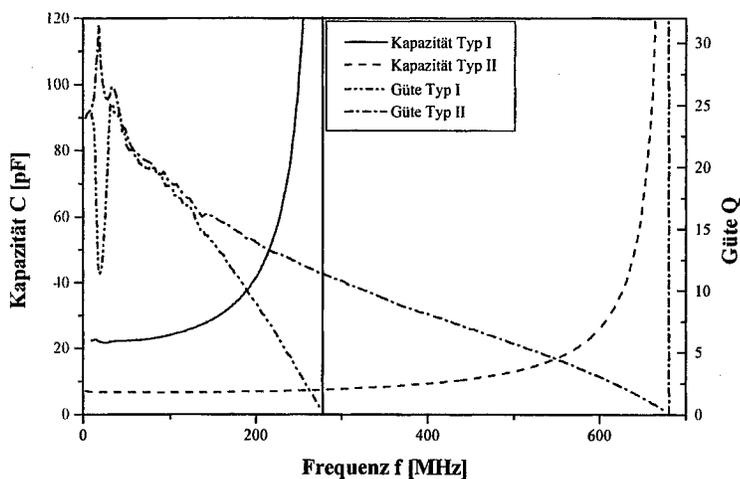


Abb. 5.9: Kapazität und Güte von zwei Plattenkondensatoren mit einer Fläche von $25,00 \text{ mm}^2$ (Typ I) und $6,22 \text{ mm}^2$ (Typ II)

Die Resonanzfrequenz beträgt für den Kondensatortyp I $f_R = 280$ MHz und für den Kondensatortyp II $f_R = 685$ MHz. Für ein Dielektrikum mit Verlusten lässt sich die komplexe Permittivitätszahl $\underline{\epsilon}_r$ wie folgt definieren:

$$\underline{C} = \underbrace{C_0}_{\substack{\text{geometrische} \\ \text{Kapazität}}} \cdot |\underline{\epsilon}_r| \cdot e^{-j\delta} = C_0 \cdot (\epsilon' - j \cdot \epsilon'') \quad (5.13)$$

ϵ' und ϵ'' lassen sich aus der gemessenen Impedanz und der geometrischen Kapazität $C_0 = \epsilon_0 \cdot A \cdot d^{-1}$ des Plattenkondensators bestimmen:

$$\epsilon' = -\frac{\text{Im}(\underline{Z})}{\omega \cdot C_0 \cdot |\underline{Z}|^2} \quad \text{und} \quad \epsilon'' = \frac{\text{Re}(\underline{Z})}{\omega \cdot C_0 \cdot |\underline{Z}|^2} \quad (5.14)$$

ϵ' und ϵ'' sind für die untersuchten Kondensatoren in Abbildung 5.10 dargestellt. Im Bereich der Resonanzfrequenz bewirkt die parasitäre Induktivität der Zuleitung einen überproportional starken Anstieg des Blindwiderstandes, weshalb ϵ' und ϵ'' vergrößert gemessen werden. Für Frequenzen $f \ll f_R$ lässt sich der Maximalwert des Realteils der relativen Permittivität, bezeichnet als ϵ_{stat} , bestimmen.

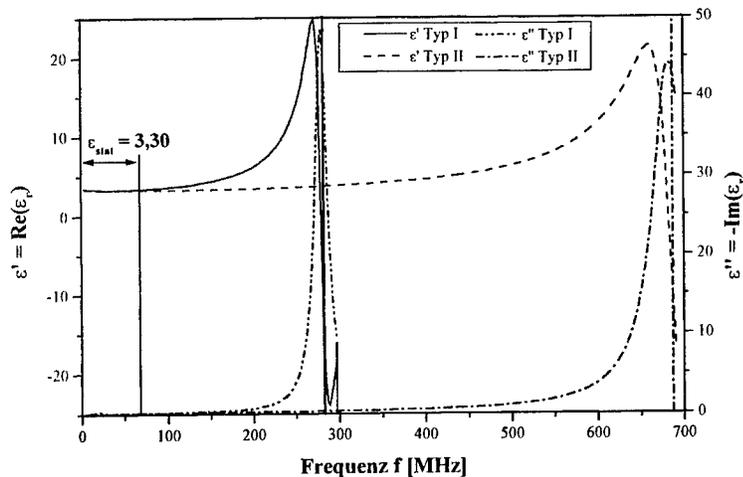


Abb. 5.10: Über die Impedanz spezifizierte relative Permittivität $\underline{\epsilon}_r = \epsilon' - j \cdot \epsilon''$. Weit unterhalb der Resonanzfrequenz ergibt sich daraus ein ϵ_{stat} von 3,30 für den Photolack Epon SU 8.

Für den Photolack Epon SU8 wird ein ϵ_{stat} von 3,30 gemessen. Dies ist ein typischer Wert für Epoxydharze, die für die Passivierung von Induktivitäten bzw. deren Kupferleitungen verwendet werden.

5.3 Demonstratoren in 3D-Technik

Im Folgenden wird die Messung der Induktivität, der Güte und des Widerstandes an fünf SMT-Spulen, die mit dem MST-Batch-Prozess hergestellt wurden, präsentiert. Als Vergleichsreferenz zu den MST-Spulen dient der Mittelwert über zehn industriell gefertigte Spulen der Baugröße 0402. Die Referenzspulen wurden bei der Fa. Panasonic mittels Laserwendeln gefertigt, wobei der Hersteller eine Induktivität von $L = 22,0 \pm 1,1$ nH angibt. Die Referenzmessung entspricht in den folgenden Graphen der schwarzen Messkurve.

Die Messungen wurden alle mit dem radialen Messaufnehmer und mit derselben Kalibrierung durchgeführt, um einen objektiven Vergleich zwischen den Induktivitäten zu ermöglichen.

Induktivität

Abbildung 5.11 zeigt das Ergebnis der Induktivitätsmessung. Der Induktivitätswert wird bei einer Frequenz von 100 MHz angegeben, da dadurch die innere Induktivität aufgrund des Skin-Effekts kaum noch zur Gesamtinduktivität beiträgt und da der Netzwerkanalysator für kleinere Messfrequenzen einen größeren Fehler aufweist.

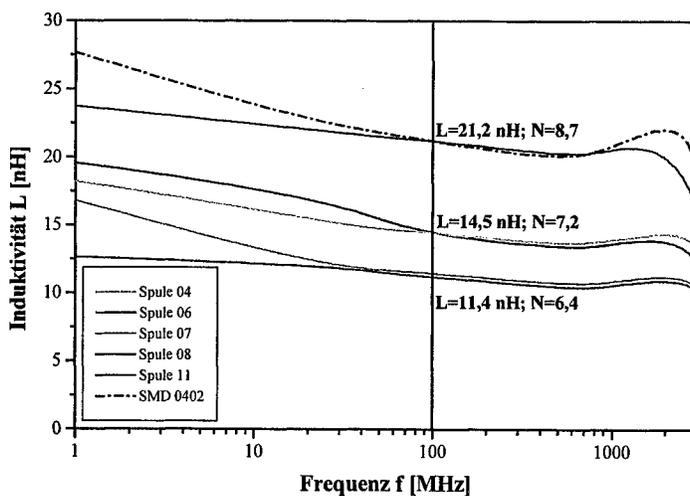


Abb. 5.11: Gemessene Induktivität an fünf MST-Spulen und Vergleichsreferenz SMD 0402

Die Induktivität kann als empfindliches experimentelles Maß für die Anzahl der Windungen der Spule verwendet werden, da die Windungszahl N quadratisch in die Induktivität eingeht. Für die Polyimidspulenkörper der Fa. Bartels Mikrotechnik beträgt die Querschnittsfläche $0,28 \text{ mm}^2$ und der Umfang $2,01 \text{ mm}$. Daraus lässt sich entsprechend Gleichung (2.4) und (2.5) auf Seite 12 die Windungszahl in Abhängigkeit von der Induktivität wie folgt berechnen:

$$N \cong 1,9 \cdot \sqrt{L[nH]} \quad (5.14)$$

Die hergestellten MST-Spulen haben somit sechs (grüne Kurven), sieben (blaue Kurven) und acht (rote Kurve) Windungen, obwohl für alle Spulen die selbe Lithographiemaske mit acht Windungen verwendet wurde. Dies liegt darin begründet, dass die Position der Spulenkörper gegenüber den Justiermarken um bis zu $100 \mu\text{m}$ versetzt sind. Dadurch wird die Windungsstruktur, je nach Spulenkörperposition, ganz oder nur teilweise auf den Spulenkörper übertragen.

Güte

Die kritischste Kenngröße zur Beurteilung der Qualität einer Spule und damit der Brauchbarkeit des Herstellungsverfahrens ist die Güte. Abbildung 5.12 zeigt die Güten der MST-Spulen im Vergleich zu den Referenzspulen: Der Maximalwert Q_{max} der Güte ist bei den MST-Spulen deutlich größer als bei den industriell gefertigten Spulen.

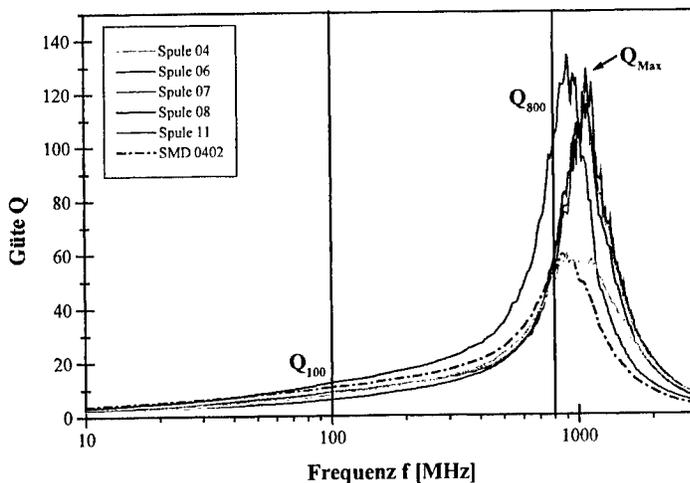


Abb. 5.12: Güten der MST-Spulen und der industriell gefertigten SMD 0402-Spulen (schwarz)

In Tabelle 5.1 sind die Werte für die Güte bei 100 MHz, bei 800 MHz und die maximal erreichte Güte angegeben. Der Mittelwert der maximalen Güte ist bei den MST-Spulen um den Faktor Zwei größer als bei den Referenzspulen. Somit ist das MST-Herstellungsverfahren prinzipiell dazu geeignet, qualitativ hochwertigere Spulen zu produzieren, als dies mit der Technik des Laserwendelns möglich ist.

Güte	Spule 04	Spule 06	Spule 07	Spule 08	Spule 11	Mittelwert	Referenz
Q_{100}	9	8	9	7	14	9	11
Q_{800}	49	53	55	60	102	64	53
Q_{Max}	60	128	127	124	144	117	60

Tab. 5.1: Gütewerte bei 100 MHz, 800 MHz und der Maximalwert
In den letzten beiden Spalten wird der Mittelwert über fünf MST-Spulen mit dem Mittelwert über zehn industriell gefertigte Spulen verglichen.

Elektrischer Widerstand

Ein hoher Gütewert ist in erster Linie auf geringe ohmsche Verluste, besonders bei hohen Frequenzen, zurückzuführen. Abbildung 5.13 zeigt den elektrischen Widerstand der MST-Spulen und der Referenz.

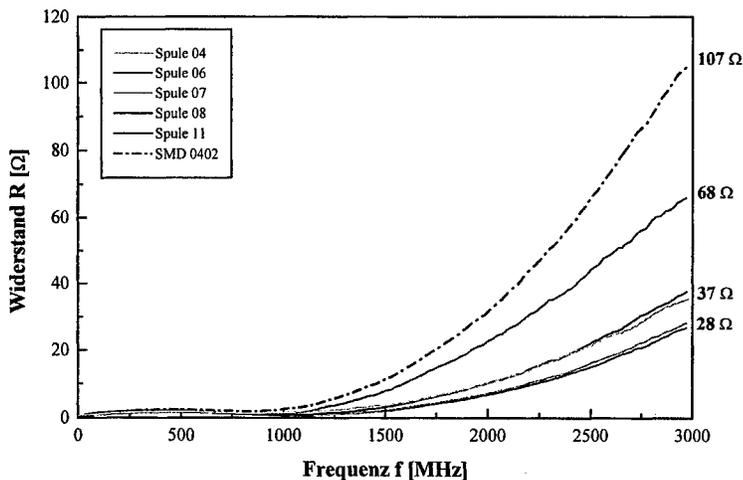


Abb. 5.13: Elektrischer Widerstand der MST-Spulen und der industriell gefertigten SMD 0402-Spulen

Für Frequenzen oberhalb 1 GHz steigt der Widerstand der mit Laserwendeln gefertigten Spulen deutlich stärker an als bei den MST-Spulen. Die MST-Spule 11 (rote Kurve) lässt sich mit den Referenzspulen am besten vergleichen, da diese MST-Spule die gleiche Induktivität und damit die gleiche elektrische Länge wie die lasergewendelten Spulen besitzt. Bei einer Frequenz von 3,0 GHz hat diese Spule nur 60 % des Widerstandes der Referenzspulen. Abbildung 5.14 zeigt den nach der Frequenz differenzierten Widerstand für die lasergewendelten Spulen (schwarze Kurve) und für die MST-Spule 11 (rote Kurve). Die blaue Kurve entspricht der Skintiefe, wobei für den spezifischen Widerstand der experimentell gemessene Wert von $2,08 \mu\Omega\text{cm}$ verwendet wird.

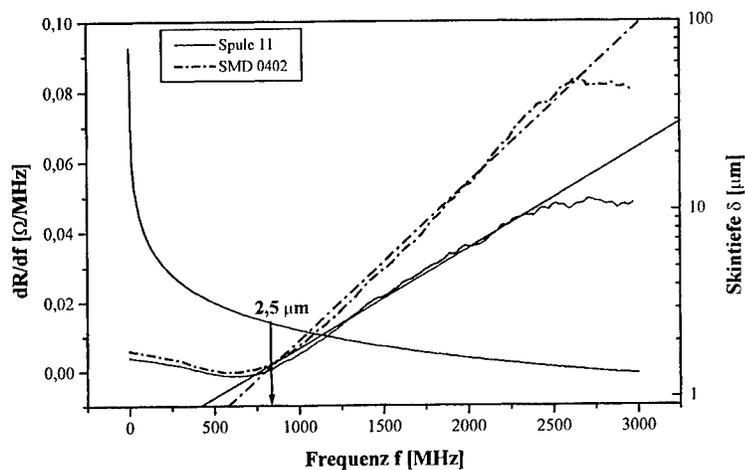


Abb. 5.14: Differentialer Widerstand $\frac{\partial R}{\partial f}$ für die MST-Spule 11 und die Referenzspulen; die blaue Kurve entspricht der Eindringtiefe bzw. Skintiefe δ (logarithmisch aufgetragen)

Bei einer Leiterbahndicke von ca. $10 \mu\text{m}$ ist der Skineneffekt etwa ab 500 MHz nicht mehr vernachlässigbar. Dies führt zu einem Anstieg des differentiellen Widerstandes. Oberhalb von 800 MHz (bis etwa 2,5 GHz) steigt der nach der Frequenz differenzierte Widerstand linear an, wobei die lineare Steigung für die lasergewendelten Spulen um den Faktor 1,6 größer ist als für die MST-Spule. Somit driftet der Widerstandsanstieg für die unterschiedlich hergestellten Spulen oberhalb 800 MHz auseinander. Der Grund dafür ist, dass die Oberflächenrauigkeit der Kupferwindungen bei den lasergewendelten Spulen deutlich schlechter ist als bei den MST-Spulen.

Abbildung 5.15 zeigt den Windungsbereich und die Seitenflanke einer Windung von einer Spule der Bauform 0603, die mit Laserwendeln hergestellt wurde. Vergleicht man diese Bilder mit den Windungen der MST-Spulen (Abbildung 5.16), so weisen die

lasergewendelten Spulen besonders im Bereich der Seitenflanke eine deutlich größere Oberflächenrauigkeit auf.

Die weißen Balken in Abbildung 5.15.b entsprechen einer Größe von $2\ \mu\text{m}$. Die Körner und Spitzen mit Abmessungen im Bereich zwischen $1\ \mu\text{m}$ und $5\ \mu\text{m}$ entstehen beim Aufschmelzen des Kupfers durch den Laserstrahl.

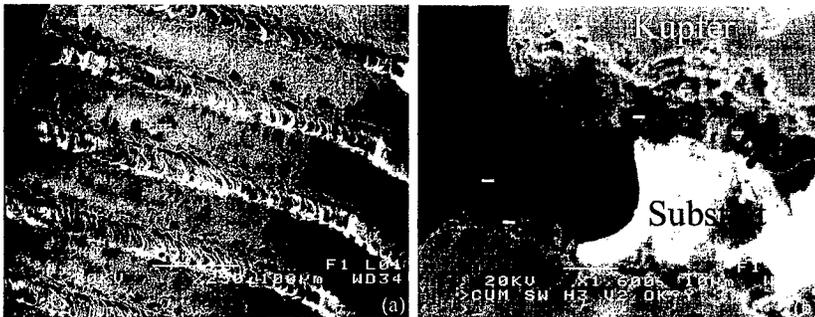


Abb. 5.15: Windungsbereich einer mit Laserwendeln hergestellten Spule der Bauform 0603:
a) 250-fache Vergrößerung b) Seitenflanke mit 1600-facher Vergrößerung

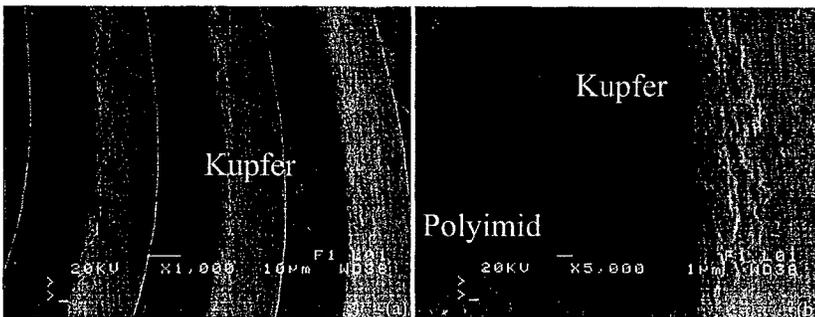


Abb. 5.16: Windungsbereich einer MST-Spule:
a) 1000-fache Vergrößerung b) Seitenflanke mit 5000-facher Vergrößerung

Wie die Elektronenmikroskopaufnahmen in Abbildung 5.16 demonstrieren, ist die Oberflächenrauigkeit der MST-Spulenwindungen deutlich geringer als $1\ \mu\text{m}$. Darin liegt der technologische Vorteil des mikrosystemtechnischen Herstellungsverfahrens, womit sich die besseren elektrischen Eigenschaften der MST-Spulen gegenüber den lasergewendelten Spulen erklären lassen.

6. Fazit und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war es nachzuweisen, dass sich SMT-Induktivitäten der Bauform 0402 mit photolithographischen Verfahren herstellen lassen. Es konnte gezeigt werden, dass dies mit einem Semi-Additiv-Verfahren unter Verwendung von Mikrosystemtechnologien (kurz: MST-Verfahren) möglich ist. Die Demonstratoren wurden im Vergleich zu industriell gefertigten Referenzproben (Laserwendeln) mit einer besseren Güte hergestellt. Dies ist letztendlich darauf zurückzuführen, dass man mit dem MST-Verfahren einen homogeneren Windungsquerschnitt und eine wesentlich glattere Windungsoberfläche erzielen kann. Verfahrenstechnisch wird dies durch die photolithographisch erzeugte Galvanoform und die Differenzätzung unter Verwendung einer relativ dünnen Flächenmetallisierung erreicht. Die photolithographische Galvanoform garantiert ein nahezu senkrechtes Aufwachsen der Windungsflanken, wogegen Subtraktivtechniken (Rückätzen, Laserwendeln) immer ein Aufrauen der Windungsflanken bewirken. Die kurze Expositionszeit der Spulen beim Differenzätzen minimiert die Unterätzung und die aufrauende Korngrenzenätzung. Mit einer elektrochemischen Differenzätzung lässt sich die Oberflächenmorphologie der Kupferwindungen noch zusätzlich verbessern.

Der Prozess wurde bislang noch nicht hinsichtlich der Güte optimiert, sondern es wurden nur die einzelnen Prozessschritte aufeinander abgestimmt und die technische Machbarkeit bewiesen. Eine weitere Prozessverfeinerung und die Verwendung der neuen LCP-Substrate lässt vermuten, dass sich die erreichbare Güte nochmals steigern lässt.

Darüber hinaus konnte gezeigt werden, dass die minimale Strukturgröße bei der photolithographischen Abbildung der Galvanoform¹ nicht nur durch Beugungseffekte, sondern auch durch die Lichtstrahldivergenz der Belichtungsmaschine bestimmt wird. Die Effekte der Lichtstrahldivergenz lassen sich durch Kompensationsstrukturen in der Lithographiemaske korrigieren, solange die Kompensationsstrukturen größer als die minimale Strukturweite aufgrund der Beugung bleiben². Durch alternative Lichtquellen wie beispielsweise einen Laser lässt sich die Linienverbreiterung infolge der Lichtstrahldivergenz nahezu vollständig unterdrücken.

Eine Abschätzung der minimalen Strukturgröße zeigt, dass sich mit einer Standardoptik³ ein Windungsabstand von 18 μm auf der Bauform 0402 realisieren lässt. Dies entspricht in etwa derselben Strukturgröße, die man mit dem Laserwendeln erzielt. Somit kann mit dem MST-Verfahren unter Verwendung von Standardmaschinen der Halbleitertechnologie die Bauform 0402 mit Induktivitäten hinauf bis zu etwa 120 nH gefertigt werden. Wird bei dem MST-Verfahren statt einer Standardbelichtungsmaschine eine nahezu divergenzfreie Laserlichtquelle verwendet, so lässt sich bereits für die Bauform 0402 die minimale Strukturgröße gegenüber dem Laserwendeln verbessern. Für die nächst kleinere Bauform 0201 lässt sich der Windungsabstand nochmals deutlich reduzieren, da der Durchmesser des Spulenkörpers und damit der Proximityabstand halbiert sind. Dies bedeutet, dass mit der entwickelten Technologie mehrere Shrink-Generationen realisiert werden können.

Die entwickelte Technologie gestattet dann eine partielle Parallelisierung der Fertigung (Batch-Prozessierung), wenn es gelingt, die einzelnen Spulenkörper mit hoher Maßgenauigkeit in einem steifen Gefüge anzuordnen. Die Forderung nach geringsten Fertigungstole-

¹ auf nicht-planaren Substraten mit variierendem Proximityabstand

² $b_{\text{min}} \approx \sqrt{\lambda} \cdot s$

³ LEGO-Optik der Fa. Karl Süß

ranzen ergibt sich aus der photolithographischen Abbildung der Galvanoform. Für die Massenfertigung solcher SMT-Substrate in engsten Toleranzen wurde mit einem temperaturbeständigen Kunststoff als Basismaterial und einer Hybridtechnik für das Substratdesign ein neuer Weg in der Spulenkörperherstellung eingeschlagen:

Ein dünner Metallträger aus Bronze, der sich aufgrund der Reproduzierbarkeit von Stanzwerkzeugen in allen Abmessungen mit einer Genauigkeit von 10 µm fertigen lässt, dient als Rahmen, der die Positionsgenauigkeit der Spulenkörper auch über große Distanzen gewährleistet. In die einzelnen Aussparungen des Metallträgerstreifens werden kleine Verbände von Spulenkörpern, Elementarzellen mit etwa 30 Einheiten, mittels Spritzguss abgeformt. So entsteht ein Gefüge, das in xy-Richtung bei geringsten Fertigungstoleranzen eine hohe Steifigkeit aufweist, aber in z-Richtung aufgrund der Elastizität des Metallträgerstreifens flexibel bleibt und auf eine Spule mit großem Radius gerollt werden kann. Die einzelnen Spulen durchlaufen so die gesamte Fertigung in einem Endlosband.

Aufgrund der gestellten Anforderungen wie der Spritzgussfähigkeit bei kurzen Zykluszeiten, Wärmeformbeständigkeit, galvanischen Metallisierung, geringen Oberflächenrauigkeit und Abformung kleinster Kavitäten muss der bisherige Werkstoff Aluminiumoxid durch einen LCP-Kunststoff (Typ 7738-S der Fa. DuPont) ersetzt werden.

Diese Form der Substratherstellung kann für mikrosystemtechnische Anwendungen, die bisher neben Silizium hauptsächlich schwer zu verarbeitende Kunststoffe¹ wie Polyamid und Polyimid als Substratmaterial verwenden, als Vorlage dienen.

Damit die Spulen die Fertigung bis zum Endprodukt komplett im Metallträgerstreifen durchlaufen können, muss auch die Schutzpassivierung mit photolithographischen Methoden strukturierbar sein. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der auf dem Epoxydharz Epon SU 8 basierende Lack als Schutzpassivierung untersucht. Die Spulen, die mit diesem Lack passiviert wurden, haben zwei von insgesamt sechs Eignungstests² nicht bestanden. Für die Zukunft bleibt zu klären, ob dieser Photolack bei veränderten Backtemperaturen und Zeiten doch verwendet werden kann, oder ob ein anderes Passivierungssystem wie beispielsweise ein photosensitives Polyimid hier zum Einsatz kommen muss.

Da die Verzinnung der Lötflächen bereits bei der größeren Bauform 0603 galvanisch erfolgt, können diese Prozesse durch die Umstellung von Trommelware auf Bandbetrieb für das MST-Verfahren übernommen werden.

Ungeklärt ist bis jetzt das zerstörungsfreie Vereinzeln der fertig prozessierten Spulen aus dem Substratverband. Dieser Prozess kann nicht direkt aus der Halbleitertechnologie³ übernommen werden, da die dünne, verzinnete Metallisierungsschicht der Lötflächen direkt auf der Schnittlinie liegen muss; überstehende Haltestege können nicht akzeptiert werden. Trotzdem darf die Metallisierung nicht verletzt werden.

Bis zur endgültigen Implementierung des MST-Verfahrens in die Fertigung müssen die Back-End-Prozessschritte 'Passivieren' und 'Vereinzeln' ausgewählt und angepasst werden. Weiterhin müssen die entwickelten Prozessschritte auf die neuen LCP-Substrate (bisher: Polyimid) angewendet werden. Die einzige Schnittstelle zum Substrat ist allerdings die Flächenmetallisierung, weshalb nur der Prozess der stromlos chemischen Metallabscheidung von der Umstellung auf den LCP-Kunststoff betroffen ist. Darüber hinaus muss auf den neuen Substraten anhand einer für die Massenproduktion tauglichen Optik die minimale Strukturgröße und damit die maximal herstellbare Induktivität ermittelt werden.

¹ hinsichtlich sehr kleiner Strukturen und Massenproduktion.

² Lötwärmetest nur bedingt bestanden; Totalausfall bei den raschen Temperaturwechseln.

³ Vereinzeln mit einer Diamantsäge.

Das MST-Verfahren lässt erwarten, dass man im Vergleich zu einer Fertigungslinie auf Basis des Laserwendelns niedrige Investitions- und Fertigungskosten für den Aufbau und den Betrieb einer Linie erreichen kann. Bei den Investitionskosten lassen sich durch die Anschaffung einer Belichtungsmaschine die kostenintensiven Anlagen für serielles Laserwendeln und serielles Lackieren einsparen.

Tabelle 6.1 zeigt eine grobe Kalkulation der Materialkosten für die Herstellung von SMT-Induktivitäten der Bauform 0402 mit dem MST-Verfahren. Die Investitionskosten und die Betriebskosten (z.B. Strom) für die Maschinen sind darin noch nicht eingerechnet. Die Materialkosten von rund 0,5 Pfennig pro Spule demonstrieren die Effektivität des Verfahrens.

	Material / Prozess	Dicke [μm]	Kosten [DM/m ²]	Kosten [Pfennig/Spule]
1	Substrat		400	0,364
2	Flächenmetallisierung	0,5	10	0,009
3	Photolack / Topcoat / Entwickeln / Ablösen	20	35	0,032
4	Kupfergalvanik	20	10	0,009
5	Rückätzen	0,5	2	0,002
6	Passivieren	30	30	0,027
7	Nickelsperrschicht	2	2	0,002
8	Verzinnen	10	5	0,005
	Gesamt:		494	0,449

Tab. 6.1: Schätzung der Materialkosten für die Herstellung der SMT-Induktivitäten mit dem MST-Prozess. Die Maschinen- und Betriebskosten sind nicht mit eingerechnet.

Zusammenfassend beurteilt, birgt dieses Verfahren das Potenzial, bei niedrigeren Fertigungskosten Induktivitäten mit höherer Güte zu produzieren. Die Möglichkeit der Realisierung der nächst kleineren Bauform 0201 und noch kleinerer Bauformen ist dabei besonders hervorzuheben.

Anhand von planaren Demonstratoren wurde gezeigt, dass das MST-Verfahren im Gegensatz zum Laserwendeln die Möglichkeit zu einer Mehrschichttechnologie eröffnet. Somit könnte die Realisierung einer zweilagigen Spule der Bauform 0402 ebenso wie der Shrink zur nächst kleineren Bauform 0201 Gegenstand von zukünftigen Entwicklungen sein.

Da bei dem MST-Verfahren die Leiterzüge ähnlich aufgebaut werden wie bei der Herstellung von gedruckten Schaltungen (Platinen), kann es auch für die Herstellung von monolithischen Schaltungen weiter entwickelt werden:

Widerstände werden dabei in Planartechnologie realisiert. Für die Widerstandsschichten kann beispielsweise galvanisch abgeschiedenes Chromnickel mit Schichtdicken von etwa 100 nm verwendet werden. Somit lassen sich Widerstände im Bereich von 10 Ω bis 1 M Ω realisieren.

Kondensatoren können in 3D-Technik analog zu den Spulen als Mehrschicht-Zylinderkondensatoren ausgeführt werden. Geht man von der Bauform 0402 aus, so lassen sich Kapazitäten bis hinauf zu einigen nF realisieren. Die einzelnen Kondensatorplatten werden zusammen mit den Induktivitäten und den Leiterzügen mit dem MST-Verfahren abgeschieden. Die monolithischen Substrate lassen sich in ähnlicher Weise fertigen wie die SMT-Substrate.

7. Literaturverzeichnis

- [67C1] Coombs, C. F.: *Printed Circuits Handbook*; McGraw-Hill Verlag, New York, San Francisco, Toronto, London, Sydney, S. 3-3 bis 7-1 (1967)
- [68M1] Meinke, H., F. W. Gundlach: *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*; Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 3. Aufl., S. 1-34, (1968)
- [69B1] Behr, E.: *Hochtemperaturbeständige Kunststoffe*; Carl Hanser Verlag, München, S. 12 (1969)
- [72L1] Laeis, W.: *Einführung in die Werkstoffkunde der Kunststoffe*; Carl Hanser Verlag, München, S.143 ff. (1972)
- [73K1] Küpfmüller, K.: *Einführung in die Theoretische Elektrotechnik*; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 10. Aufl., S. 304-308 (1973)
- [74O1] Orth, Helmut: *Technische Chemie für Ingenieure*; Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH, Stuttgart, 4. Aufl., S. 54 (1974)
- [76P1] Petzow, G.: *Metallographisches Ätzen*; Gebrüder Borntraeger Verlag, Berlin, Stuttgart, 5. Aufl. (1976)
- [77B1] Biederbick, K.: *Kunststoffe*; Vogel Verlag, Würzburg, 4. Aufl., S.182 ff. (1977)
- [78E1] Ehrenstein, G. W.: *Polymer-Werkstoffe, Struktur und mechanisches Verhalten: Grundlage für d. techn. Konstruieren mit Kunststoffen*; Carl Hanser Verlag, München, Wien, 1. Aufl., S. 88 ff. (1978)
- [79E1] Ebert, Heinz: *Elektrochemie: Grundlagen und Anwendungsmöglichkeiten*; Vogel-Verlag, Würzburg, 2. Aufl., S. 175 (1979)
- [79S1] Saechtling, H.: *Kunststoff-Taschenbuch*; Carl Hanser Verlag, München, Wien, 21. Aufl., S. 399 ff. (1979)
- [80H1] Hock, A.; u.a.: *Hochfrequenzmeßtechnik, Teil 2*; Expert Verlag, Grafenau, S. 36 ff. (1980)
- [80W1] Windt, L. J.: *Semiadditivverfahren zur Leiterplattenfertigung und ihre Anwendung in der Praxis*; in: *Leiterplattenfertigung heute*, VDI-Berichte 387, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 33 ff. (1980)
- [82S1] Salmang, H.; Scholze, H.: *Keramik, Teil 1: Allgemeine Grundlagen und wichtige Eigenschaften*; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 6. Aufl., S. 195 (1982)
- [82Z1] Zinke, O, H. Seither: *Widerstände, Kondensatoren, Spulen und ihre Werkstoffe*; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2. Aufl., S. 66-75, S.217-280 (1982)

- [83E1] Elias, H.-G.: *Neue polymere Werkstoffe für die industrielle Anwendung: Struktur, Synthese, Eigenschaften, Verarbeitung*; 2. Folge; Carl Hanser Verlag, München, Wien, S. 141 ff. (1983)
- [83G1] Gächter, R.; Müller, H.: *Taschenbuch der Kunststoff-Additive: Stabilisatoren, Hilfsstoffe, Weichmacher, Füllstoffe, Verstärkungsmittel*; Carl Hanser Verlag, München, Wien, 2. Aufl., S. 411 ff. (1983)
- [83S1] Salmang, H.; Scholze, H.: *Keramik, Teil 2: Keramische Werkstoffe*; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 6. Aufl., S.111 ff. (1983)
- [83S2] Schlag, S.: *Semi-Additivtechnik*; in: *Leiterplattenfertigung heute*, VDI-Berichte 483, VDI-Verlag, Düsseldorf, S. 43 ff. (1983)
- [85S1] Sze, S. M.: *Semiconductor devices, physics and technology*; John Wiley & Sons Verlag, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, S. 433 (1985)
- [85S2] Sinnadurai, F. N.: *Handbook of Microelectronics Packaging and Interconnection Technologies*; Electrochemical Publications Ltd., Ayr (Scotland), S. 181 ff. (1985)
- [86H1] Hellerich, W.: *Werkstoff-Führer Kunststoffe: Eigenschaften, Prüfungen, Kennwerte*; Carl Hanser Verlag, München, Wien, 4. Aufl., S. 221 ff. (1986)
- [86M1] Meinke, H., F. W. Gundlach: *Taschenbuch der Hochfrequenztechnik*; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 4. Aufl., S. E 13 (1986)
- [88B1] Ballauff, M.: *Flüssig-kristalline Polymere*; in: *Chemie in unserer Zeit* 22, Nr. 2, S. 63-68 (1988)
- [88E1] Eden, K.: *Excimer Laser-Lithographie bei $\lambda = 193$ nm: Probleme und Lösungen*; Dissertation, eingereicht: RWTH Aachen, S. 45 ff. (1988)
- [88M1] Moreau, W. M.: *Semiconductor Lithography*; Plenum Press Verlag, New York, S. 355 ff. (1988)
- [88S1] Sautter, R.: *Leiterplatten mit oberflächenmontierten Bauelementen*; Vogel Verlag, Würzburg, 1. Aufl., S. 33 ff. (1988)
- [89H1] Heuberger, A.: *Mikromechnik - Mikrofertigung mit Methoden der Halbleitertechnologie*; Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokio, S. 260 ff. (1989)
- [89K1] Kuchling, H.: *Taschenbuch der Physik*, Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt a. Main, 12. Aufl., S. 626 (1989)
- [89N1] Nolde, R.: *SMD-Technik, Einstieg in die Miniatur-Elektronik*; Franzis Verlag, München, S. 9 ff. (1989)

- [89V1] Vidusek, D.A.: *Electrophoretic photoresist technology: an image of the future-today*; in: Circuit World 15 (2), S. 6-10 (1989)
- [91B1] Bronstejn, I. N., K. A. Semendjajew: *Taschenbuch der Mathematik*; B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, Verlag Harri Deutsch, Thun, Frankfurt/Main, 25. Aufl., S. 709 ff. (1991)
- [91E1] Espenhain, M.: *Leaded and Surface-Mounted Inductors for RF Applications*; in: Siemens Components 3/91, S. 112-116 (1991)
- [91K1] Krups, R.: *SMT-Handbuch: Vom CAD-Entwurf zur Platinenfertigung*; Vogel Verlag, Würzburg, S. 16 ff. (1991)
- [93M1] Menz, W.: *Mikrosystemtechnik für Ingenieure*; VCH Verlag, Weinheim, New York, Basel, Cambridge, S.189 ff. (1993)
- [94B1] Büttgenbach, S.: *Mikromechanik: Einführung in Technologie und Anwendung*; Teubner Verlag, Stuttgart, 2. Aufl., S. 56 ff. (1994)
- [94B2] Beuret, C., G.-A. Racine, J. Gobet, R. Luthier, N. F. de Rooij: *Microfabrication of 3D multidirectional inclined structure by UV lithography and electroplating*; in: Proc. Int. Workshop Micro Electro Mechanical Systems (MEMS '94), Oiso, Japan, S. 81-85 (1994)
- [94D1] Degussa AG, Arbeitsgebiet Galvanotechnik: *Arbeitsanleitung für den Elektrolyten 'Kupfer 837'*; Klarenbergstr. 53-79, D - 73525 Schwäbisch Gmünd (14.12.1994)
- [94L1] Löchel, B., A. Maciossek, M. König, H.-J. Quenzer, B. Wagner: *Electroplated Electromagnetic Components for Actuators*; in: Proc. Actuator '94, Bremen, Deutschland, S. 109-113 (15.-17.06.1994)
- [95B1] Briehl, H.: *Chemie der Werkstoffe*; B. G. Teubner Verlag, Stuttgart, S. 233 ff. (1995)
- [95K1] Kersten, P., S. Bouwstra, J.W. Petersen: *Photolithography on micromachined 3D surfaces using electrodeposited photoresists*; in: Sensors and Actuators A 51, S. 51-54 (1995)
- [95L1] Löchel, B., A. Maciossek: *Surface micro components fabricated by UV depth lithography and electroplating*; SPIE Vol. 2639, Proc. Micromachining and Microfabrication Process Technology, Austin, Texas, S. 174 (23./24.10.1995)
- [95L2] Löchel, B., A. Maciossek, H.-J. Quenzer, B. Wagner, G. Engelmann: *Magnetically driven microstructures fabricated with multilayer electroplating*; in: Sensors and Actuators A, Vol. 46-47, S. 98-103 (1995)
- [95L3] Löchel, B.: *Surface Micromachining - UV lithography and electrodeposition*; in: The Electrochemical Society: Interface, Vol. 4, Nr. 3, S.43-47 (1995)

- [95M1] Maciossek, A., B. Löchel, H.-J. Quenzer, B. Wagner, S. Schulze, J. Noetzel: *Galvanoplatting and Sacrificial Layers for Surface Micromachining*; in: *Microelectronic Engineering*, Vol. 27, S. 503-508 (1995)
- [96C1] Christensen, C., P. Kersten, S. Henke, S. Bouwstra: *Wafer through hole interconnections with high vertical densities*; in: *IEEE Trans. Compon., Packag., Manuf. Technol., Part A* 19 (4), S. 516-522 (1996)
- [96H1] Hilleringmann, U.: *Silizium-Halbleitertechnologie*; Teubner Verlag, Stuttgart, S. 42 ff. (1996)
- [96H2] Heuberger, A., B. Löchel: *Optical DUV-lithography for high microstructures*; *Microsystem Technologies* 3, S. 1-6 (1996)
- [96L1] Lorenz, H.; M. Despont; N. Fahrni; N. LaBianca; P. Renaud; P. Vettiger: *A low-cost negative resist for MEMS*; in: *Suss report* 10, S. 1 ff. (1996)
- [96L2] Loechel, B., A. Maciossek, H. J. Quenzer, B. Wagner: *Ultraviolet Depth Lithography and Galvanoforming for Micromachining*; in: *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 143, No. 1, S. 238-244 (1996)
- [96L3] Loechel, B., R. Demmeler, M. Rothe, W. Bruenger, S. Fehlberg, G. Gruetzner: *Application of optical lithography for high aspect ratio microstructures*; in: *JVST B*, Vol. 14, No. 6, S. 4179-4183 (1996)
- [96L4] Löchel, B., A. Maciossek: *Electrodeposited Magnetic Alloys for Surface Micromachining*; in: *Journal of the Electrochemical Society*, Vol. 143, No. 10, S. 3343-3348 (1996)
- [96L5] Löchel, B., A. Maciossek, M. Rothe, W. Windbracke: *Microcoils fabricated by UV depth lithography and galvanoplatting*; in: *Sensors and Actuators A*, Vol. 54, S. 663-668 (1996)
- [96L6] Linder, S., H. Baltes, F. Gnaedinger, E. Doering: *Photolithography in anisotropically etched grooves*; in: *Proc. 9th IEEE Inter. MEMS Works*, S. 38-43 (1996)
- [97C1] Cullmann, E.: *Belichtungs- und Justierungsuntersuchungen an extrem dicken Photolacken*; in: *Erzeugung dreidimensionaler Mikrostrukturen mit UV-Lithographie*, VDI/VDE-IT Seminar, München, Deutschland (10.11.1997)
- [97D1] Despont, M.; H. Lorenz; N. Fahrni; J. Brugger; P. Renaud; P. Vettiger: *High-aspect-ratio, ultrathick, negative-tone near-UV photoresist for MEMS application*; in: *Proc. of the 10th IEEE Int'l Workshop on MEMS (MEMS '97)*, Nagoya, Japan (26.-30.01.1997)
- [97D2] Du Pont: *Deflection temperature under flexural load*; in: *Tests for thermoplastic materials used in the electrical and electronics industries*; Technical Report TRG 1424, S. 56 (1997)

- [97H1] Heschel, M., S. Bouwstra: *Conformal coating by photoresist of sharp corners of anisotropically etched through-holes in silicon*; in: Tech. Dig., 1997 Int. Conf. Solid State Sens. Actuators (Transducers '97), Chicago, USA, S. 209-212 (16.-19.06.1997)
- [97I1] Informationszentrum Technische Keramik: *Eigenschaften der Technischen Keramik*; in: http://www.keramverband.de/elektrische_eigen.html; (21.12.1997)
- [97M1] Madou, M.: *Fundamentals of Microfabrication*; in: CRC Press, New York, S. 1-5 (1997)
- [98D1] Degussa AG, Arbeitsgebiet Galvanotechnik: *Arbeitsanleitung für die Elektropolitur 6100*; Klarenbergstr. 53-79, D - 73525 Schwäbisch Gmünd (07.01.1998)
- [98D2] Doll, T., F. Kaesen, H. Geiger, F. Bartels: *Long-solenoid-type SMT coil batchprocessing in simple MEMS technology*; in: Proc. Microsystem Technologies 98, 6th International Conference on Micro-, Electro-, Opto-, Mechanical Systems and Components, Potsdam, S. 633 (1.-3.12.1998)
- [98D3] Doll, T., F. Kaesen, F. Bartels: *Nutzenfertigung von Induktivitäten mit Mikro-techniken*; in: Deutsches Patent- und Markenamt DE 198 17 852 A1
- [98E1] Espenhain, M., K. Marth: *Temperature-resistant to 160 °C*; in: Siemens Components 5/98 (1998)
- [98H1] Holze, R.: *Leitfaden der Elektrochemie*; Teubner Verlag, Stuttgart, Leipzig, S. 216 (1998)
- [98H2] Härtl, Alfred: *SMD-Surface Mounted Devices*; VTP Verlag Fürst, Nürnberg, S. 10 (1998)
- [98H3] Heschel, M., S. Bouwstra: *Conformal coating by photoresist of sharp corners of anisotropically etched through-holes in silicon*; in: Sensors and Actuators A, Vol. 70 (1-2), S. 75-80 (1998)
- [98N1] Nibler, N. u.a.: *Hochfrequenzschaltungstechnik: Funktionen und Anwendung von Halbleitern und Leitungen in Hochfrequenzschaltungen*; Expert Verlag, Renningen, Malmshheim, 3. Aufl., S. 6 ff. (1998)
- [98R1] Reichel, H.; G. Engelmann; J. Wolf: *Lithography for future packaging and system integration*; in: Suss Report 14, S. 1-9 (1998)
- [99C1] Coilcraft: *0402CS Surface Mount Inductors*; in: <http://www.coilcraft.com/misc/0402csp.html>; Coilcraft Inc., 1102 Silverlake Road, Carry IL 60013, USA (15.07.1999)
- [99C2] Coilcraft: *0402CS (1005) Ceramic Chip Inductors*; in: <http://www.coilcraft.com/0402cs.html>; Coilcraft Inc., 1102 Silverlake Road, Carry IL 60013, USA (1999)

- [99E1] Epcos AG: *Drosseln und Induktivitäten für Hochfrequenz und EMV*; Epcos AG, Marketing Kommunikation, Best.-Nr. EPC:24001, München, S. 68 (1999)
- [99E2] Epcos AG: *Electronic Parts and Components - Produktübersicht*; Epcos AG, Marketing Kommunikation, Best.-Nr. EPC:65002-7400, München, S. 43 (1999)
- [99G1] Göhler, L., J. Krause: *Chips perfekt verpacken*; in: *Elektronik Praxis*; Nr. 6, (1999)
- [99K1] Karl Süß KG: *Mask Aligner Product Line*; in: *Produktinformation Mask Aligners*, Schleißheimer Str. 90, D - 85748 Garching (1999)
- [99K2] Karl Süß: *Süss Bottomside Alignment*; in: *Produktinformation Mask Aligners*, Schleißheimer Str. 90, D - 85748 Garching (1999)
- [99L1] Luxbacher, T., A. Mirza: *Spray coating for MEMS and advanced packaging*; in: *High Density Interconnect 2* (5), S. 36-41 (1999)
- [99M1] Micro Resist Technology GmbH: *Produktinformation*; Köpenicker Str. 325, D - 12555 Berlin (1999)
- [99O1] Ono, S., T. Osaka, K. Naitoh, Y. Nakagishi: *Mechanism of Direct Copper Plating on Nonconducting Substrates*; in: *Journal of The Electrochemical Society*, 146 (1), S. 160-166 (1999)
- [99R1] Ramasubramanian, M., B. N. Popov, R. E. White, K. S. Chen: *A Mathematical Model for Electroless Copper Deposition on Planar Substrates*; in: *Journal of The Electrochemical Society*, 146 (1), S. 111-116 (1999)
- [99S1] Shin-Etsu Chemical Co., Ltd: *Shin-Etsu Epoxy Molding Compounds - KMC Series*; *Produktinformation*, 2-6-1 Otemachi, Chiyoda-ku, Tokyo 100-0004, Japan (1999)
- [99S2] Schnupp, R., R. Baumgärtner, R. Kühnhold, H. Ryssel: *Electrodeposition of Photoresist: Process optimization and chemical resistance*; in: *Eurosensors XIII, The 13th European Conference on solid state transducers*, The Hague, Niederlande (12.-15. 09.1999)
- [99S3] *Spray coating covers tough topography*; *Solid State Technology* 42 (6), S. 24 (1999)
- [99T1] Takano, N., N. Hosoda, T. Yamada, T. Osaka: *Mechanism of the Chemical Deposition of Nickel on Silicon Wafers in Aqueous Solution*; in: *Journal of The Electrochemical Society*, 146 (4), S. 1407-1411 (1999)
- [00A1] Allresist GmbH: *Photoresists & Prozesschemikalien*; in: *Produktinformation Photo- und E-Beam Resists, Entwickler, Verdünner und Reiniger*, Friedrichshagener Str. 9, D - 12555 Berlin, S. 1 (2000)

- [00A2] Aufderheide, K.: *Mündliche Mitteilung am 17.07.2000*; Gebr. Krallmann GmbH, Siemensstr. 24, D - 32111 Hiddenhausen (2000)
- [00B1] Bühler: *Mündliche Mitteilung (Demonstration) bei einem Besuch bei der Fa. Wüst GmbH & Co. KG*, Jägerstr. 4a, D - 82008 Unterhaching (29.08.2000)
- [00C1] Coilcraft: *Tape & Reel Specifications*; in: <http://www.coilcraft.com/trchips.html>; Coilcraft Inc., 1102 Silverlake Road, Carry IL 60013, USA (22.12.2000)
- [00C2] Componex: *Vielschicht-Chipinduktivitäten*; in: <http://www.componex.de/deutsch/produkte/index.htm>; Componex GmbH, Elektronische Bauelemente; Vogelsanger Weg 80, D - 40470 Düsseldorf (2000)
- [00D1] Disco HI-TEC Europe GmbH: *Fully Automatic Dicing Saw - 600 Series*; in: Produktinformation der Fa. Disco HI-TEC Europe GmbH, Liebigstr. 8, D - 85551 Kirchheim, Nr. HD2000.08.2000ML (2000)
- [00E1] Eisele, I.: *Grundlagen der Silizium-Halbleitertechnologie*; Manuskript zur Vorlesung und Schulung, Institut für Physik, Fakultät für Elektrotechnik, Universität der Bundeswehr München, Überarbeitete Fassung 2000, S. 20.3 (2000)
- [00F1] Fischer, W.-J.: *Mikrosystemtechnik*; Vogel Verlag, Würzburg, S. 39 ff. (2000)
- [00H1] Huber, J.: *Mini-Relais trotz maximalen Temperaturen*; in: *Plastverarbeiter* 51, Nr. 4, S. 74 (2000)
- [00I1] Eisele, I., F. Wiest: *Verfahren zur Herstellung einer elektrisch leitfähigen Struktur auf einer nichtplanen Oberfläche und Verwendung des Verfahrens*; in: Deutsches Patent- und Markenamt DE 100 45 072.5
- [00K1] Kutchoukov, V. G., J. R. Mollinger, A. Bossche: *New photoresist coating method for 3-D structured wafers*; in: *Sensors and Actuators* 85, S. 377-383 (2000)
- [00L1] Lopez-Villegas, J. M., J. Samitier, C. Cane, P. Losantos, J. Bausells: *Improvement of the Quality Factor of RF Integrated Inductors by Layout Optimization*; in: *IEEE Trans. On Microwave Theory and Techniques*, Vol. 48, No. 1, S. 76-83 (2000)
- [00M1] micro resist technology GmbH: *Handling and product information of SU8*; in: Produktinformation, Köpenicker Str. 325, D - 12555 Berlin (2000)
- [00M2] Muraka, S. P.: *Copper - fundamental mechanisms for microelectronic applications*; John Wiley & Sons Verlag, New York, Chichester, Weinheim, Brisbane, Singapore, Toronto, S. 125 ff. (2000)
- [00M3] Mescheder, U.: *Mikrosystemtechnik - Konzepte und Anwendung*; B. G. Teubner-Verlag, Stuttgart, Leipzig, S. 58 ff. (2000)

- [00M4] Middeke, H.: *Schriftliche Mitteilung vom 07.07.2000*; Atotech Deutschland GmbH, Erasmusstr. 20, D - 10553 Berlin (2000)
- [00P1] Panasonic Industrial Europe GmbH: *Inductors(Coils)-Chip Inductors*; in: <http://www.maco.panasonic.co.jp/www/cgi/jvcr21pz.cgi?E+PZ+3+AGA0001>; Panasonic Industrial Europe GmbH, Winsbergring 15, D - 22525 Hamburg (2000)
- [00P2] Pham, N.P., K. T. Ng, M. Bartek, P. M. Sarro, B. Rejaei, N. J. Burghartz: *A micromachining post-process module for RF silicon technology*; in: Electron Devices Meeting, 2000. IEDM Technical Digest. International, S. 481-484 (2000)
- [00R1] Rauchmaul, S.: *Mündliche Mitteilung bei einem Besuch bei der Fa. EPCOS AG, Bereich OFW*; Anzinger Str. 13, D - 81617 München (08.09.2000)
- [00R2] Ruprecht, R., T. Gietzelt, M. Guttman, T. Hanemann, M. Hecke, K. Müller, V. Piotter: *Abformverfahren für mikrostrukturierte Bauteile aus Kunststoff und Metall*; in: 4. Statuskolloquium des Programms Mikrosystemtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, S. 31 ff. (30./31. 03.2000)
- [00S1] Saile, V., S.-J. Chung, H. Hein, J. Mohr, F.-J. Pantenburg: *Fertigungstechniken für die primäre Strukturierung von Kunststoffen*; in: 4. Statuskolloquium des Programms Mikrosystemtechnik, Forschungszentrum Karlsruhe, S. 17 ff. (30./31. 03.2000)
- [00S2] Shichijo, S.: *Technology for the Internet Era - Introduction and Overview*; in: 2000 IEDM Short Course - Technology for the Internet Era, San Francisco (10.12.2000)
- [00S3] Schnupp, R., R. Baumgärtner, R. Kühnhold, H. Ryssel: *Electrodeposition of Photoresist: optimization of deposition conditions, investigation of lithographic process and chemical resistance*; Sensors and Actuators 85, S. 310-315 (2000)
- [00T1] Ticono GmbH: *FORTRON 6850L6 - TICONA GmbH - PPS*; in: <http://www.m-base.de/ticono/mcbbnet/indexd.html>, D - 65926 Frankfurt a. Main (21.09.2000)
- [00T2] Truzzi, C.: *Riding the integration wave*; in: European Semiconductor 11/2000, S.17-18 (2000)
- [00W1] WebElementsTM: *The periodic table on the WWW*; in: <http://www.webelements.com/>; (11.07.2000)
- [00W2] Wiest, F., G. Freitag, M. Hochberg, A. Scherer, I. Eisele, T. Doll: *Fully MEMS- and Nanostructured Batch Fabrication of SMT Inductors*; in: VDE World Microtechnologies Congress, Micro.tec 2000 proceedings Volume 2, S. 843 ff. (25.-27.09.2000)
- [01E1] Espenhain, M.: *Schriftliche Mitteilung vom 06.03.01*; Epcos AG, Bereich Induktivitäten, In den Seewiesen 26, D - 89508 Heidenheim (2001)

- [01E2] Espenhain, M.: *Mündliche Mitteilungen bis zum März 2001*; Epcos AG, Bereich Induktivitäten, In den Seewiesen 26, D - 89508 Heidenheim (2001)
- [01H1] Hsu, H.-H., K.-H. Lin, S.-J. Lin, J.-W. Yeh: *Electroless Copper Deposition for Ultralarge-Scale Integration*; in: Journal of The Electrochemical Society, 148 (1), C47-C53 (2001)
- [01K1] Kortenaar, M. V., J. J. M. Goeij, Z. I. Kolar, G. Frens, P. J. Lusse, M. R. Zuiddam, E. Drift: *Electroless Silver Deposition in 100 nm Silicon Structures*; in: Journal of The Electrochemical Society, 148 (1), S. C28-C33 (2001)
- [01S1] Saliba, R., C. Mingotaud, F. Argoul, S. Ravaine: *Electroless Deposition of Gold Films under Organized Monolayers*; in: Journal of The Electrochemical Society, 148 (1), S. C65-C69 (2001)
- [01T1] Toko Germany GmbH: *Part numbers for PTL1005-F Series Photolithographic Chip Inductors*; in: http://www.tokoam.com/passives/inductors/chip_inductors/partNumbers.asp?productID=PTL1005-F; Toko Germany GmbH, Meerbuscher Strasse 64-78, D - 40670 Meerbusch (2001)

8. Anhang

A.1 Übersicht über die verwendeten Abkürzungen

CVD	Chemical Vapour Deposition	PEI	Polyetherimid
ECD	Electrochemical Deposition	PES	Polyethersulfon
EIA	Electronic Industries Association	PESI	Polyesterimid
EN	Europa Norm	PI	Polyimid
FEP	Tetrafluorethylen-Hexafluorpropylen-Copolymer	PMMA	Polymethylmethacrylat
HDT	Heat Deflection Temperature	POM	Polyoxymethylen
IEC	International Electrotechnical Commission	PPO	Polyphenylenoxid
LCP	Liquid Crystal Polymer	PPP	Poly-p-phenylen
LIGA	Lithographie, Galvanik und Abformtechnik	PPQ	Polyphenylchinoxalin (engl. quinoxaline)
MELF	Metal Electrode Face Bonding	PPX	Poly-p-xylylen
MST	Mikrosystemtechnik	PSU	Polysulfon
PA	Polyamid	PPS	Polyphenylsulfid
PAI	Polyamidimid	PTFE	Polytetrafluorethylen
PAN	Polyacrylnitril	PVD	Physical Vapour Deposition
PBI	Polybenzimidazole	PVDF	Polyvinylidenfluorid
PC	Polycarbonat	SMD	Surface Mount Device
PE	Polyethylen	SMT	Surface Mount Technology
PEEK	Polyetheretherketon	THMD	Through Holes Mount Device

A.2 Tafel zur Elektrochemie

Element	Atommasse u	Wertigkeit v	Äquivalent- masse m_a [g]	Dichte ρ [g/cm ³]	Äquivalent- volumen V_a [cm ³ /Val]	Technisches Äquivalent \dot{A}_{tech} [g/Ah]
Kupfer (Cu ¹)	63,546	1	63,546	8,96	7,09	2,370
Kupfer (Cu ²⁺)	63,546	2	31,773	8,96	3,545	1,185
Nickel (Ni ²⁺)	58,71	2	29,355	8,90	3,3	1,095
Zinn (Sn ²⁺)	118,69	2	59,345	7,28	8,15	2,214
Zinn (Sn ⁴⁺)	118,69	4	29,6725	7,28	4,075	1,107

➤ **Äquivalentmasse:**
$$m_a \left[\frac{\text{g}}{\text{Val}} \right] = \frac{\text{Atommasse [g]}}{\text{Wertigkeit des beteiligten Ions [Val]}}$$

➤ **Äquivalentvolumen:**
$$V_a \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{Val}} \right] = \frac{m_a \left[\frac{\text{g}}{\text{Val}} \right]}{\rho \left[\frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \right]}$$

➤ **Technisches Äquivalent:**
$$\dot{A}_{tech} \left[\frac{\text{g}}{\text{Ah}} \right] = \frac{m_a \left[\frac{\text{g}}{\text{Val}} \right]}{26,8 \left[\text{Ah} \right]}$$

A.4 Werkstoffeigenschaften von LCP

Nachfolgende Tabelle zeigt die Werkstoffeigenschaften des 30 % mineralverstärkten LCP-Werkstoffs 6330 NC von der Fa. DuPont. Für den Werkstoff 7738-S, der für die SMT-Substrate eingesetzt werden soll, gibt es bis jetzt noch keine vollständigen Datenblätter. Dessen Eigenschaften unterscheiden sich im Wesentlichen durch die höhere Wärmeformbeständigkeit und sind ansonsten sehr ähnlich.

Pos.	DuPont 6330 NC - Werkstoffeigenschaften bei Normalklima	Wert
A Allgemein		
1	Spez. Gewicht	1,63 g/cm ³
2	Schwindung in Fließrichtung	0,0 %
3	Schwindung quer zur Fließrichtung	0,5 %
B Mechanische Eigenschaften		
1	Zugfestigkeit	125 MPa
2	Bruchdehnung	4,0 %
3	Zugmodul	11,6 GPa
4	Dauerbiegefestigkeit	125 MPa
5	Biege-E-Modul	9,6 GPa
6	Druckmodul	5,9 GPa
7	Kerbschlagzähigkeit	160 J/m
C Thermische Eigenschaften		
1	Extrapolierte Endschmelztemperatur	350 °C
2	Schmelzpunkt	335 °C
3	Glasübergangstemperatur	120 °C
4	Linearer Ausdehnungskoeffizient in Fließrichtung (25 °C bis 125 °C)	8 · 10 ⁻⁶ K ⁻¹
5	Linearer Ausdehnungskoeffizient quer zur Fließrichtung (25 °C bis 125 °C)	20 · 10 ⁻⁶ K ⁻¹
6	Formbeständigkeitstemperatur nach HDT/A	244 °C
D Elektrische Eigenschaften		
1	Spez. Durchgangswiderstand	> 10 ⁶ Ω cm
2	Spez. Oberflächenwiderstand	> 10 ⁶ Ω cm
3	Durchschlagsfestigkeit (kurzzeitig)	26 kV/mm
4	Dielektrizitätskonstant @ 1 kHz	3,6
5	Dielektrizitätskonstant @ 1 MHz	3,2
6	Dielektrizitätskonstant @ 1 GHz	3,9
7	Verlustfaktor @ 1 kHz	0,013
8	Verlustfaktor @ 1 MHz	0,028
9	Verlustfaktor @ 1 GHz	0,002

A.5 Prozessparameter

Pos	Prozess	Bemerkung	Temperatur	Prozeßdauer
A Substratreinigung:				
1	Aceton	Ultraschall	RT	10 min
2	Isopropanol	Ultraschall	RT	10 min
3	Spülen	Mit DI-Wasser im Rinser	RT	10 min
4	Trocknen	Umluftofen	120 °C	180 min
B Startmetallisierung: entweder stromlos chemisch entsprechend Kap. 4.1.2 oder physikalisch				
1	Titan Sputtern	DC; 350 V; 200 nm	RT	60 min
2	Kupfer Verdampfen	300 nm	RT	30 min
C Lithographie: Photolack EAGLE 2100 (Fa. Shipley); Top Coat wird empfohlen				
1	Haftverbesserung (optional)	Acid Cleaner 1118	RT	5 min
2	Elektrophoretische Lackierung	150 V; 50 bis 100 mA	22 °C	ca. 60 sec
3	Spülen / trocken blasen	DI-Wasser / Stickstoff	RT	1 min
4	Softbake	Vakuum: 1×10^{-2} mbar	RT	120 - 180 min
5	Exposure	Hg-i-Linie; 0,8 J/cm ²	RT	30 sec
6	Entwickeln	EAGLE 2005; pH 0,13	40 ± 2 °C	200 sec
7	Entwicklungsstop	DI-Wasser, vorsichtig Spülen	RT	30 sec
D Galvanik: Degussa Typ Cu 837				
1	Abscheidung	20 mA/cm ² (langsam beginnen)	22 °C	60 min
2	Spülen / trocken blasen	DI-Wasser / Stickstoff	RT	10 min
E Lack strippen: Möglich mit Aceton oder org. Remover				
1	Remover	MP 1165	40 °C	120 min
2	Spülen	DI-Wasser	RT	10 min
3	Trocknen	Umluftofen	105 °C	10 min
4	Aceton (optional)		40 °C	15 min
5	Isopropanol (optional)		40 °C	10 min
6	Spülen (optional)	DI-Wasser	RT	10 min
7	Trocknen (optional)	Umluftofen	105 °C	10 min
8	Plasmaätzter (optional)	DESCUM	RT	2 × 10 min
F Differenzätzung:				
1	H ₂ SO ₄ und H ₂ O ₂	H ₂ SO ₄ : H ₂ O ₂ : DI = 4 : 1 : 35	RT	ca. 2 min
2	Elektropolitur (optional)	Degussa; EP 6100; 6 A	RT	30 sec
3	Spülen	DI-Wasser	RT	3 min
4	HF-Dip für Titan (optional)	1% HF	RT	3 min
5	Spülen (sehr vorsichtig)	DI-Wasser	RT	10 min
6	Trocknen	Umluftofen	105 °C	20 min
G Passivieren: mit Su8-5 (alternativ: Lötstopplack Ronacoat OPSR 5600 oder Photoimid)				
1	Sprühlackierung	SU8 : Aceton ≈ 1 : 1; 2 bar	RT	5 min
2	Softbake	Umluftofen	95 °C	12 min
3	Relaxieren	Gelblichtbereich		2 bis 3 h
4	Exposure	Hg i-Linie; 0,6 J/cm ²	RT	20 sec
5	Postexposurebake	Umluftofen	95 °C	18 min
6	Relaxieren	Gelblichtbereich		20 min
7	Entwickeln		RT	3 min
8	Entwicklungsstop	Trocken blasen (oder Isopropanol)	RT	30 sec
9	Aushärten	Umluftofen	95 °C	2 Tage

Danksagung

Ich danke Herrn Prof. Dr. Ignaz Eisele für das interessante Dissertationsthema, für seine Unterstützung und Hilfe in allen schwierigen Phasen sowie für die vielen Freiheiten, die ich bei meiner Arbeit am Institut für Physik genießen konnte.

Durch das Interesse der Fa. Epcos an dieser Arbeit haben sich bis zum Schluss immer wieder neue Fragestellungen ergeben, die dieses Thema sehr vielfältig und interessant gemacht haben. In diesem Zusammenhang möchte ich mich für die konstruktive Zusammenarbeit und die vielen wertvollen Informationen besonders bei Herrn Dipl. Phys. Manfred Espenhain und Herrn Dr. Ralf Humke von der Fa. Epcos AG, Bereich Induktivitäten, bedanken.

Herrn Dr. Bernd Löchel vom BESSY II in Berlin danke ich für die wertvollen Hinweise zur Galvanoformung.

Herrn Dr. Hermann Middecke von der Fa. Atotech danke ich für das stromlos chemische metallisieren der Polyimidsubstrate.

Herrn Prof. Dr. Lindenmeier danke ich, dass er mir die Möglichkeit gab, die hergestellten Induktivitäten an seinem Institut zu vermessen. Ebenso gilt mein ganz besonderer Dank Herrn Dipl.-Ing. T. F. Bechteler und Herrn Dipl.-Ing. Gunter Freitag, dass wir doch noch ein paar der 'kleinen Flöhe' vermessen konnten, ohne dabei alle auf dem Boden zu verlieren.

Herrn Dr. Theodor Doll und Herrn Dr. Florian Kaesen danke ich für das Zustandekommen des Projektes.

Ich danke all meinen Kolleginnen und Kollegen ganz herzlich für die gute Zusammenarbeit, die Unterstützung, auf die ich immer zählen konnte, und natürlich auch für den vielen Spaß, den wir während und nach der Arbeit hatten. Deshalb werde ich mich immer gerne an die Zeit am Institut für Physik zurückerinnern. Besonders bedanken möchte ich mich in diesem Zusammenhang bei Torsten Sulima, Christoph Fink, Ronny Winter, Martin Zimmer, Markus Burgmair, Tanja Stimpel, Stephan Hofmann, Harry E. Hoster, Stefan Sedlmaier, Hans Messarosch, Klaus Scharnagel, Harald Geiger, Alexander Fuchs, Jörg Schulze, K. G. Anil, Anton Bayerstadler, Carolin Tolksdorf, Gunter Freitag und Peter Bieringer.

Mein herzlicher Dank gilt auch den Herren Peter Ciecierski, Walter Funke, Peter Sitter, Michael Meyer, Andreas Rippler und Hans Bergauer, die mich immer sowohl bei kleinen Problemen mit der Verwaltung wie auch bei technischen Problemen tatkräftig unterstützt haben.

Ich danke Frau Elena Grüner, Frau Anita Krawazyk und Frau Christa Springer für ihre großartige und schnelle Hilfe bei allen organisatorischen und verwaltungstechnischen Aufgaben.

Ich danke Herrn Martin Büttner für das Korrekturlesen der Arbeit.

Aus unerfindlichen Gründen möchte ich mich ganz besonders bei meiner Frau Sonja und meinem Sohn Paul Severin bedanken.